GOBIERNO DE ARAGON

Departamento de Agricultura

INFORMACIONES TECNICAS

Direccion General de Tecnologia Agraria

Núm. 88 Año 2000

Centro de Tecnicas Agrarias



Producción y gestión del compost

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

INTRODUCCION

El compostaje es un proceso biológico aerobio, que bajo condiciones de aireación, humedad y temperaturas controladas y combinando fases mesófilas (temperatura y humedad medias) y termófilas (temperatura superior a 45ºC), transforma los residuos orgánicos degradables, en un producto estable e higienizado, aplicable como abono o sustrato. Es decir, el compostaje es:

- una técnica de estabilización y tratamiento de residuos orgánicos biodegradables. El calor generado durante el proceso (fase termófila) va a destruir las bacterias patógenas, huevos de parásitos y muchas semillas de malas hierbas que pueden encontrarse en el material de partida, dando lugar a un producto higienizado.
- una técnica biológica de reciclaje de materia orgánica que al final de su evolución da humus, factor de estabilidad y fertilidad del suelo.
- el resultado de una actividad biológica compleja, realizado en condiciones particulares; el compostaje no es, por tanto, un único proceso. Es, en realidad, la suma de una serie de procesos metabólicos complejos procedentes de la actividad integrada de un conjunto de microorganismos. Los cambios químicos y especies involucradas en el mismo varían de acuerdo a la composición del material que se quiere compostar.

El producto obtenido al final de un proceso de compostaje, el compost, posee un importante contenido en materia orgánica y nutrientes, pudiendo ser aprovechado como abono orgánico o como substrato.

1. BENEFICIOS Y DESVENTAJAS DEL COMPOSTAJE

Desde el punto de vista ecológico e industrial las ventajas del compostaje se manifiestan en la eliminación y reciclado de muchos tipos de residuos, solventando los problemas que ocasionaría su vertido, y en la obtención de materiales apropiados para su uso en la agricultura. En este último sentido, se persigue aumentar la similitud entre la materia orgánica de los residuos y el humus de los suelos, eliminar los posibles productos tóxicos que puedan permanecer en los residuos por la descomposición incompleta del substrato, y aumentar la estabilidad biológica o resistencia a la biodegradación, con lo que se resuelven o atenúan los efectos desfavorables de la descomposición de los restos orgánicos sobre el propio suelo.

1.1. Beneficios del uso del compost

Entre los beneficios del compostaje se incluyen:

a) Acondicionamiento del suelo:

La utilización de compost como enmienda orgánica o producto restituidor de materia orgánica en los terrenos de labor tiene un gran potencial e interés en nuestro país, ya que la presencia de dicha materia orgánica en el suelo en proporciones adecuadas es fundamental para asegurar la fertilidad y evitar la desertización. Además, cabe comentar que la materia orgánica en el suelo produce una serie de efectos de repercusión agrobiológica muy favorable (Tabla 1). Entre estos están:

Mejora las propiedades físicas del suelo: la materia orgánica contribuye favorablemente a mejorar la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola (serán más permeables los suelos pesados y más compactos los ligeros), aumenta la permeabilidad hídrica y gaseosa, y contribuye a aumentar la capacidad de retención hídrica del suelo mediante la formación de agregados.

Tabla 1. Efectos más destacados de la materia orgánica en los suelos cultivados (Urbano, 1992)

Propiedades del suelo	Efectos de la materia orgánica humificada	
FISICAS	Aumento de la capacidad calorífica Reducción de las oscilaciones térmicas Da soltura a los arcillosos y cohesiona los arenosos Aumenta la permeabilidad hídrica y gaseosa Facilita el drenaje Aumenta la capacidad de retención hídrica Mejora el balance hídrico	Suelos más calientes en primavera Agregación de las partículas elementales Aumenta la estabilidad estructural Suelos menos encharcados Reduce la erosión Reduce la evaporación
QUIMICAS	Aumenta el poder tampón Aumenta la capacidad de cambio catiónico Forma fosfohumatos Mantiene las reservas de nitrógeno	Regula el pH Mantiene los cationes de forma cambiable Forma quelatos
BIOLOGICAS	Favorece la respiración radicular Regula la actividad microbiana Modifica la actividad enzimática Favorece el estado sanitario de los órganos subterráneos Es fuente de energía para los microorganismos heterótrofos El CO_2 desprendido favorece la solubilización de compuestos minerales	Favorece la germinación de las semillas Mejora la nutrición mineral Activa la rizogénesis

Mejora las propiedades químicas: La materia orgánica aporta macronutrientes N, P, K y micronutrientes, y mejora la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Esta propiedad consiste en absorber los nutrientes catiónicos del suelo, poniéndolos más adelante a disposición de las plantas, evitándose de esta forma la lixiviación. Por otra parte, los compuestos húmicos presentes en la materia orgánica forman complejos y quelatos estables, aumentando la posibilidad de ser asimilados por las plantas.

Mejora la actividad biológica del suelo: La materia orgánica del suelo actúa como fuente de energía y nutrición para los microorganismos presentes en el suelo. Estos viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización. Una población microbiana activa es índice de fertilidad de un suelo.

b) Facilita el manejo de estiércoles:

El compostaje reduce el peso, el volumen, el contenido en humedad, y la actividad de los estiércoles. El compost es mucho más fácil de manejar que los estiércoles, y se almacena sin problemas de olores o de insectos y puede ser aplicado en cualquier época del año. Esto minimiza las pérdidas de nitrógeno y el impacto ambiental en el campo.

c) Aplicabilidad al suelo:

Tanto el compost como los estiércoles son buenos acondicionadores del suelo con valor fertilizante. Normalmente el estiércol se añade al suelo directamente, proporcionándole calidades comparables a las que alcanzaría con el compost. Sin embargo, el acondicionamiento del suelo, no justifica por si solo hacer compost a partir de estiércoles. Hay beneficios complementarios por la utilización de compost, como son:

1. El compost convierte el contenido en nitrógeno presente en los estiércoles en una forma orgánica más estable. Por tanto, esto produce unas menores pérdidas de nitrógeno, el cual permanece en una forma menos susceptible de lixiviarse y, por tanto, de perder amonio.
2. La mayoría de los estiércoles tienen una elevada relación carbono/nitrógeno. Cuando se aplican al suelo directamente, el exceso de carbono en los estiércoles hace que el nitrógeno en el suelo quede inmovilizado y, por tanto, no disponible para el cultivo. El compostaje disminuye la relación carbono/nitrógeno a niveles aceptables para la aplicación al suelo.

3. El calor generado mediante el proceso de compostaje reduce la viabilidad de las semillas que pudieran estar presentes en el estiércol.

d) Disminuye los riesgos de contaminación y malos olores:

En la mayoría de las granjas, el estiércol es más un residuo que un subproducto con valor añadido. Los principales inconvenientes son los olores y la contaminación por nitratos. El compostaje puede potencialmente disminuir estos problemas.

e) Destruye los patógenos:

La destrucción de patógenos durante la fase termófila permite la utilización no contaminante del abono orgánico. En la Tabla 2 se recoge la temperatura y tiempo necesario para la destrucción de algunos de los patógenos y parásitos más comunes que pueden estar presentes en el residuo a compostar.

Tabla 2. Temperatura y tiempo de exposición necesario para la destrucción de los parásitos y patógenos más comunes (Golueke, 1972).

Organismo	Temperatura y tiempo de exposición
Salmonella typhosa	Se elimina rápidamente en el montón del compost. Son suficientes 30 min. a 55-60º C para su eliminación. No se desarrolla a temperaturas superiores a 46º C
Salmonella sp.	Se destruye al exponerse 1 hora a 55º C o 15-20 minutos a 60º C
Shigella sp.	Se destruye al exponerse 1 hora a 55º C
Escheirchia coli	La mayoría mueren con una exposición de 1 hora a 55º C o 15-20 min. a 60º C
Taennia saginata	Se elimina en unos pocos minutos a 55º C
Larvas de Trichinella spiralis	Mueren rápidamente a 55º C e instantáneamente a 60º C
Brucella abortus	Se elimina con exposiciones a 62-63º C durante 3 min. o a 55º C durante 1 hora
Micrococcus pyogenes var. aureus	Muere después de 10 minutos de exposición a 50º C
Streptococcus pyogenes	Muere después de 10 minutos a 54º C
Mycobacterium tuberculosis var. hominis	Muere después de 15-20 min. a 66º C o instantáneamente a 67º C
Corynebacterium diphtheriae	Se elimina por exposición durante 45 min. a 55º C
Huevos de Ascaris lumbricoides	Mueren en menos de 1 hora a temperaturas superiores a 55º C

f) Producto comercializable:

Una de las características más atractivas del compostaje es que existe un mercado para el producto. Entre los compradores potenciales se incluyen los agricultores que practican agricultura ecológica u Horticultura más o menos intensiva, fruticultores, particulares que poseen viviendas con jardín, dueños de pastizales, operadores de campos de golf y propietarios de viveros. El precio de los compost varía considerablemente en función de las características, envasado y calidad, materiales de partida utilizados y destino del producto terminado, puesto que aún hoy en día, se le considera como un producto residual en unos casos o como un producto de lujo en otros. El precio depende igualmente del mercado local.

1.2. Desventajas del uso de compost

Entre las principales desventajas que se le atribuyen al compost están:

Las de *tipo económico*: A la hora de plantearse un compostaje hay que tener en cuenta que este proceso supone una cierta inversión, ya que se necesitan una serie de equipos y a veces unas mínimas instalaciones, si bien es cierto que la mayoría de las operaciones del proceso se pueden realizar con maquinaria existente en cualquier granja.

Las de la *disponibilidad de terreno*: No hay que olvidar que dentro del proceso de compostaje hay que prever un terreno para almacenar los materiales de partida, otro para mantener los composts durante la fase de maduración y otro para almacenar los productos ya terminados, además del espacio dedicado al compostaje propiamente dicho.

Las de *tipo climatológico*: Si el clima es muy frío, el proceso se alarga debido a las bajas temperaturas, e incluso, a veces, se para, debido a la imposibilidad de hacer funcionar los equipos adecuadamente a causa de las heladas y nevadas. Las lluvias excesivas también pueden dar lugar a problemas de encharcamientos y de anaerobiosis si no hay un buen drenaje y una inclinación adecuada del terreno.

Las de *tipo medioambiental*: Estas desventajas se pueden evitar con una buena práctica a la hora de realizar el proceso y con una buena elección del terreno donde se van a almacenar, tanto los materiales iniciales como los compost en fase de maduración, ya que es en este periodo donde hay más peligro de que las pérdidas de nitrógeno, en forma de nitratos, contaminen las aguas subterráneas.

Las de *valor fertilizante*: En general los compost tienen fama de que su contenido en nitrógeno es muy bajo, pero eso sólo es cierto si a lo largo del proceso ha habido pérdidas debido a una mala práctica. Por otra parte, las cantidades que hay que aplicar de compost son superiores a las que habría que aplicar cuando se usan fertilizantes químicos de síntesis, debido a que en un compost los nutrientes se encuentran en formas muy complejas que necesitan sufrir en el suelo un proceso de mineralización para ser asimilados por las plantas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la aportación en sucesivas cosechas será menor debido al efecto residual a que da lugar la más lenta liberación de nutrientes.

En siete ensayos realizados en los secanos semiáridos españoles durante tres años, en los que se compararon tres variantes de fertilización (Testigo: sin fertilizar, Orgánica: 2.500 kg/ha de compost (Humedad: 33%, M.O: 57%, C: 28%, N: 3%, P2O5: 1%, K2O: 5%, Na: 1%) y Química: 100-60-60 UF de N, P, K) mostraron que la aplicación del compost no aumentó el rendimiento del cereal frente al testigo sin abonar, y el abonado químico lo aumentó durante dos de los tres años, lo que pone de manifiesto la importancia relativa de la fertilización orgánica en el secano semiárido (Figura 1.)

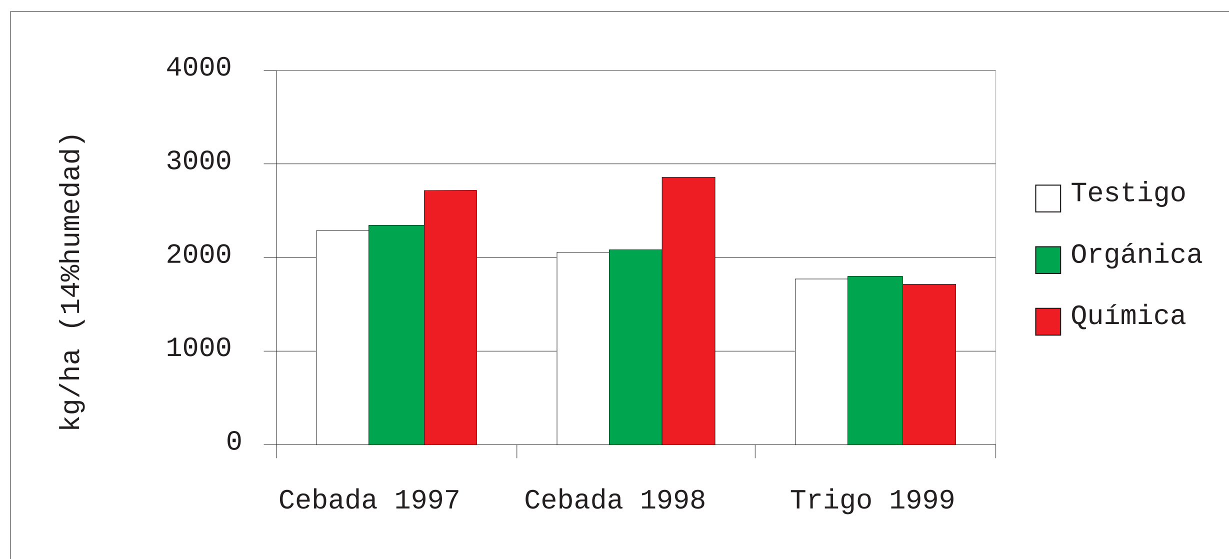


Figura 1. *Medias de las producciones obtenidas en cebada (1997 y 1998) y trigo (1999) según diferente fertilización aplicada, Testigo: Sin fertilizar, Orgánica: 2.500 kg/ha compost y Química: 100-60-60 UF de NPK, en distintas localidades españolas.*

2. PROCESO DE COMPOSTAJE. PARAMETROS DE CONTROL

2.1. Materiales de partida

La obtención de un buen compost depende fundamentalmente de la composición y la preparación de la materia orgánica de partida, que puede experimentar variaciones en función de factores diversos, del proceso de compostaje y maduración, y del procesado final (refinado y depuración).

Como materia compostable puede utilizarse cualquier producto orgánico fermentable.

En general, se suele tratar de residuos orgánicos de distinta naturaleza. La clasificación de los residuos compostables se puede realizar en base a distintos criterios:

a) Según su naturaleza química:

Residuos orgánicos:

Ricos en carbono.

Ricos en nitrógeno.

Residuos minerales (en realidad, adyuvantes del compostaje):

Residuos básicos.

Sales minerales (fosfatos, carbonatos, sulfatos).

b) Según su estado físico:

Residuos sólidos (pajas, basuras, maderas).

Residuos semisólidos (efluentes agroalimentarios y ganaderos).

c) Según su origen:

Procedentes de actividades domésticas.

Procedente de actividades industriales.

Procedente de actividades agrícolas.

Los residuos sólidos urbanos (RSU), lodos de depuradora (no autorizados en agricultura ecológica), residuos agro-industriales y ganaderos, contienen una gran cantidad de materia orgánica que puede ser usada con fines agrícolas. Algunos de estos residuos requieren que la fracción orgánica sea separada de los materiales inertes, como es el caso de los RSU, y, en general, todos requieren una reducción de tamaño y, algunos, un acondicionamiento químico biológico antes de su incorporación al suelo.

2.2. Proceso de compostaje

El compostaje, mediante una serie de biotransformaciones oxidativas similares a las que ocurren en el suelo, actúa sobre la materia orgánica mineralizando la fracción más fácilmente asimilable por los microorganismos y humificando (proceso de producción de complejos coloidales relativamente estables y resistentes a la acción microbiana) los compuestos más difícilmente atacables. El resultado final es la obtención de un compuesto parcialmente mineralizado y humificado que puede sufrir mineralizaciones posteriores más lentas, una vez incorporado al suelo.



Figura 2. *Compostaje de cascarilla de arroz y estiércol procedente de una granja de pollos.*

En un proceso de compostaje pueden distinguirse diferentes etapas. En primer lugar y dependiendo de la materia prima de partida, suele ser necesario realizar tratamientos del material previos a la fase de fermentación propiamente dicha, los cuales van encaminados a facilitar el proceso de fermentación. Por ejemplo, en el caso de residuos líquidos ganaderos, su alto porcentaje de humedad exige un tratamiento previo de desecación o bien su mezcla con otros agentes sólidos como residuos agrícolas y forestales (Figura 2). Estos últimos, debido a su bajo contenido en nitrógeno, es aconsejable mezclarlos con fuentes nitrogenadas como estiércoles, purines o subproductos de origen animal (harinas de carne o de pescado, etc.). En general, los pretratamientos llevados a cabo están en función del uso final del producto.

El compostaje espontáneo de la materia orgánica se produce en la naturaleza. Sin embargo, para que el compostaje de residuos sea adecuado para su desarrollo industrial debe adaptarse a requisitos básicos como ser rápido, tener bajo consumo de energía, garantizar la calidad del producto final, la higiene de producción, etc. Para ello, el proceso debe ser cuidadosamente controlado atendiendo a los siguientes parámetros de operación: Composición de la materia prima, temperatura y humedad, aireación, relación C/N y pH. Finalizada la etapa de compostaje y maduración del compost obtenido, se lleva a cabo un procesado final del mismo en el que se controla la granulometría y la presencia de material inerte.

2.3. Principales parámetros de control en el proceso de compostaje

En el proceso de compostaje el principio básico más importante es el hecho de que se trata de un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos, y por tanto, tiene todas las ventajas y limitaciones de este tipo de procesos. Según esto, los factores que afectan a los microorganismos son los que requieren mayor control a lo largo del proceso. Entre estos factores están: la aireación, el contenido en humedad y temperatura, pH, los factores nutricionales y la relación C/N.

a) Aireación:

Es un factor importante en el proceso de compostaje y, por tanto, un parámetro a controlar. Como ya se ha comentado, el proceso de compostaje es un proceso aerobio, se necesita la presencia de oxígeno para el desarrollo adecuado de los microorganismos. La aireación tiene un doble objetivo, aportar por una parte el oxígeno suficiente a los microorganismos y permitir al máximo la evacuación del CO_2 producido. La aireación debe mantenerse en unos niveles adecuados teniendo en cuenta además que las necesidades de oxígeno varían a lo largo del proceso, siendo bajas en la fase mesófila, alcanzando el máximo en la fase termófila y disminuyendo de nuevo al final del proceso (Figura 3).

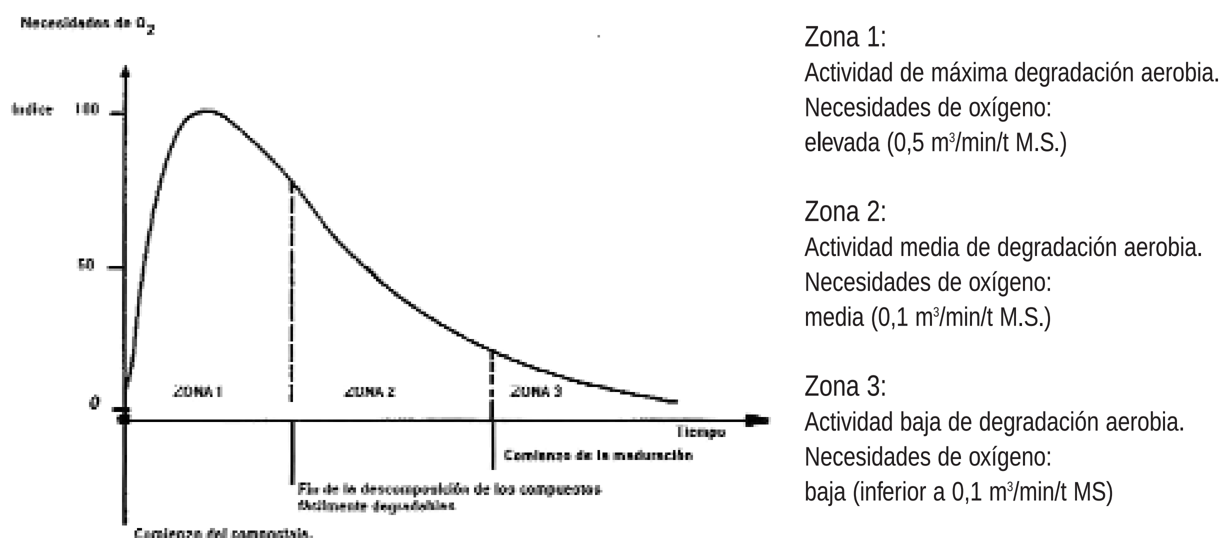


Figura 3. *Curva teórica de las necesidades de oxígeno durante el compostaje (Mustin, 1987).*

La aireación no debe ser excesiva, puesto que se pueden producir variaciones en la temperatura y en el contenido en humedad. Así, por ejemplo, un exceso de ventilación podría provocar evaporación que inhibiría la actividad microbiológica hasta parar el proceso de compostaje, con lo que podría dar la impresión de que el proceso había concluido. Por otra parte, el exceso de ventilación incrementaría considerablemente los gastos de producción.

b) Humedad:

La humedad es un factor muy relacionado con el anterior. Los microorganismos necesitan agua como vehículo para transportar los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular. La humedad óptima se puede situar alrededor del 55% aunque varía dependiendo del estado físico y tamaño de las partículas, así como del sistema empleado para realizar el compostaje. Si la humedad disminuye demasiado, disminuye la actividad microbiana con lo cual el producto obtenido será biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta, el agua saturará los poros e interferirá con la distribución del aire a través del compost. En procesos en los cuales los principales componentes sean sustratos tales como serrín, astillas de madera, paja, hojas secas, se necesita una mayor humedad, mientras en materiales como los residuos de alimentación, etc., la humedad necesaria es mucho menor.

c) Temperatura:

Durante el proceso de compostaje la temperatura varía dependiendo de la actividad metabólica de los microorganismos. De acuerdo a este parámetro, el proceso de compostaje se puede dividir en cuatro etapas: Mésofila, termófila, enfriamiento y maduración (Figura 4).



Figura 4. *Evolución de la temperatura (-) y pH (—) durante las diferentes etapas del compostaje (Costa* et al.*, 1991).*

Inicialmente, los residuos se encuentran a temperatura ambiente, enseguida los microorganismos crecen y la temperatura sube considerablemente, a los pocos días se alcanzan los 40º C (fase mesófila), la temperatura sigue subiendo hasta alcanzar valores comprendidos entre 60-70º C (fase termófila), la mayor parte de los microorganismos iniciales mueren y son reemplazados por otros resistentes a esa temperatura. A partir de los 60º C, los hongos termófilos cesan su actividad y la reacción se lleva a cabo por las bacterias formadoras de esporas y actinomicetos. En esta fase la generación de calor se iguala a la velocidad de pérdida de calor en la superficie de las pilas, esto marca el final de la fase termófila. Por último, se produce una nueva fase mesófila o de enfriamiento y una fase final de maduración en la

que la temperatura se iguala a la del medio ambiente. La temperatura se debe controlar, ya que, por una parte, las temperaturas bajas suponen una lenta transformación de los residuos, prolongándose los tiempos de retención, y, sin embargo, las temperaturas elevadas determinan la destrucción de la mayor parte de los microorganismos (pasteurización), fenómeno que sólo debe permitirse al final del compostaje, para asegurar la eliminación de patógenos.

La Figura 5 muestra el sistema de termopares utilizados para controlar la temperatura en una pila de compostaje de estiércol de ovino y paja de cereal. Los termopares se colocaron a diferentes profundidades puesto que existe un gradiente de temperatura desde el interior al exterior de la pila.

d) pH:

Durante el proceso de compostaje se producen diferentes fenómenos o procesos que hacen variar este parámetro. Al principio y como consecuencia del metabolismo fundamentalmente bacteriano que transforma los complejos carbonados fácilmente descomponibles, en ácidos orgánicos, el pH desciende; seguidamente, el pH aumenta como consecuencia de la formación de amoníaco, alcanzando el valor más alto, alrededor de 8,5, coincidiendo con el máximo de actividad de la fase termófila. Finalmente, el pH disminuye en la fase final o de maduración (pH entre 7 y 8) debido a las propiedades naturales de amortiguador o tampón de la materia orgánica.



***Figura 5**. Control de la temperatura de la pila mediante sensores.*

e) Factores nutricionales:

Con respecto a los factores nutricionales, el carbono es utilizado por los microorganismos como fuente de energía y el nitrógeno para la síntesis de proteínas. Las dos terceras partes del carbono son quemadas y transformadas en CO_2 y el restante entra a formar parte del protoplasma celular de los nuevos microorganismos, si bien, para la producción de proteínas, se necesita la absorción de otros elementos entre los cuales el más importante es el nitrógeno y en menores cantidades el fósforo y el azufre.

Las formas de carbono más fácilmente atacables por los microorganismos son los azúcares y las materias grasas. El nitrógeno se encuentra en casi su totalidad en forma orgánica de donde debe ser extraído o modificado por los microorganismos para poder ser utilizado por éstos.

f) Relación C/N:

La relación C/N de la masa a compostar es un factor importante a controlar para obtener una fermentación correcta y, por tanto, un producto final, de características adecuadas. A medida que transcurre el compostaje, esta relación se hace cada vez menor como puede observarse en la Figura 6, donde se muestra a modo de ejemplo la evolución que experimenta este parámetro durante el compostaje de una mezcla de estiércol de ovino y paja de cebada realizado dentro del marco del Proyecto de Investigación (INIA-SC-96081). La relación óptima C/N inicial está comprendida entre 25-35. Si es superior a 35, el proceso de fermentación se alarga considerablemente hasta que el exceso de carbono es oxidado y la relación C/N desciende a valores adecuados para el metabolismo. Si es inferior a 25 se producen pérdidas considerables de nitrógeno en forma de amoniaco. Cuando la relación C/N es elevada se podrá hacer descender artificialmente, ya sea quitando celulosa, es decir, reduciendo el carbono o aumentando el contenido de nitrógeno, por ejemplo con adición de alguna fuente nitrogenada como estiércoles de pollo o productos o subproductos de origen animal (Reglamento (CE) Nº 2381/94 de la Comisión de 30 de septiembre de 1994, si el compost es para agricultura ecológica). Si el compost se utiliza para agricultura convencional, podría añadirse nitrato amónico.

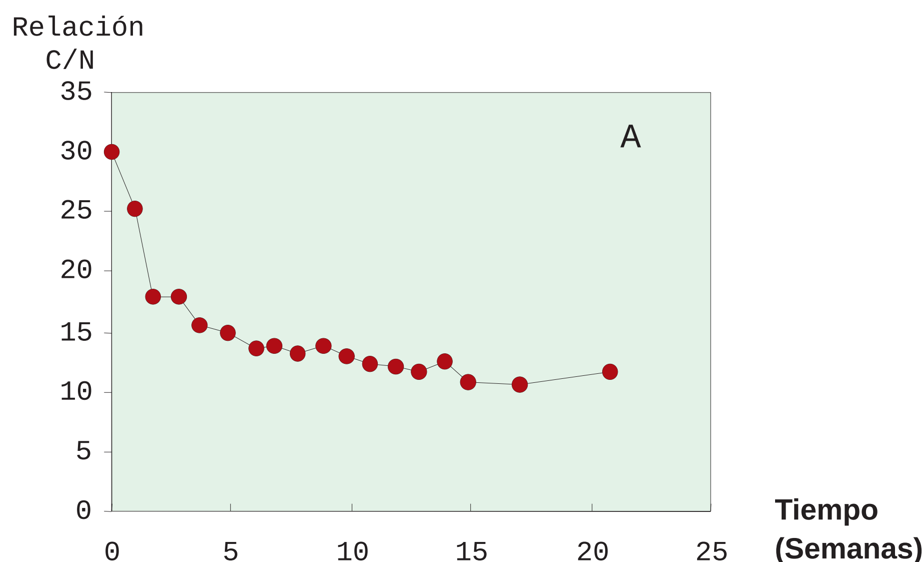


Figura 6. *Evolución de la relación C/N durante el compostaje de estiércol de ovino y paja.*

2.4. Aspectos microbiológicos del compostaje

El compostaje, como ya se ha mencionado anteriormente, es un proceso dinámico en el que se producen una serie de cambios físicos y químicos debido a la sucesión de complejas poblaciones microbianas. La naturaleza y número de microorganismos presentes en cada etapa dependen del material inicial. Al comienzo del compostaje el material se encuentra a temperatura ambiente y la flora mesófila presente en los materiales orgánicos empieza a desarrollarse utilizando los hidratos de carbono y proteínas más fácilmente asimilables. La hidrólisis y asimilación de polímeros por los microorganismos es un proceso relativamente lento, por tanto, la generación de calor disminuye hasta alcanzar la temperatura ambiente, alrededor de los 40ºC, y los organismos mesófilos (actinomicetos, hongos y bacterias mesófilas) reemprenden su actividad. La intensa actividad metabólica de estos organismos, fundamentalmente hongos y bacterias, provocan la elevación de la temperatura en el interior de la masa en compostaje. Al aumentar la temperatura empiezan a proliferar bacterias y sobre todo hongos termófilos que se desarrollan desde los 40ºC hasta los 60ºC. Estas especies empiezan a degradar la celulosa y parcialmente la lignina, con lo cual la temperatura sube hasta los 70ºC, apareciendo poblaciones de actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. Durante varios días se mantiene a esta temperatura, en una fase de actividad biológica lenta, en la que se produce la pasteurización del medio. Aunque la celulosa y la lignina a estas temperaturas se ataca muy poco, las ceras, proteínas y hemicelulosas se degradan rápidamente. Cuando la materia orgánica se ha consumido, la temperatura empieza a disminuir (el calor que se genera es menor que el que se pierde) y las bacterias, fundamentalmente los hongos mesófilos, reinvaden el interior del compost utilizando como fuente de energía la celulosa y la lignina residuales. Como consecuencia de las elevadas temperaturas alcanzadas durante el compostaje se destruyen las bacterias patógenas y parásitos presentes en los residuos de partida.

Un aspecto que ha sido ampliamente discutido es el posible interés de inocular las pilas de compostaje con microorganismos para facilitar o mejorar la evolución de un compost. Los estudios realizados en este sentido parecen indicar que la inoculación no produce grandes mejoras, y raramente son un factor limitante, cuando las condiciones ambientales son las adecuadas, dado que los microorganismos que se encuentran de forma natural en el material a compostar están más adaptados que aquellos preparados en el laboratorio.

2.5. Resumen de las condiciones de un proceso ideal

Existen numerosos datos en la bibliografía sobre los parámetros microbiológicos, químicos y físicos para un buen compostaje. Los valores más comunes de los principales parámetros quedan reflejados en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de las condiciones de un proceso de compostaje ideal (Fermor, 1993).

Parámetro	Valor
Relación C/N inicial	30-35:1
Relación C/P inicial	75-150:1
Tamaño de partícula	12,5 mm para plantas donde se utiliza agitación y aireación forzada, 50 mm para plantas sin agitación y aireación natural
Contenido en humedad	50-60%
Aireación	0,6-1,8 m^3/día Kg^{-1} sólidos volátiles durante la fase termófila o manteniendo los niveles de oxígeno entre 10-18%
Temperatura	55ºC
Agitación	Cortos períodos de agitación vigorosa, alternando con períodos sin agitación que varían desde minutos en la fase termófila a horas durante la maduración
Control pH	Normalmente no deseable
Tamaño	Cualquier longitud, pero no más de 1,5 m de alto ó 2,5 m de ancho en el caso de pilas con aireación natural. Con aireación forzada, depende de las necesidades para el precalentamiento

Finalizada la etapa de compostaje y maduración, se lleva a cabo un procesado final del mismo en el que se controla la granulometría y la presencia de materiales inertes.

3. MATERIALES INICIALES

Los ingredientes para el compostaje suelen ser subproductos orgánicos o materiales residuales. Es raro que un solo material residual tenga todas las características requeridas para un compostaje eficaz. Por tanto, es necesario mezclarlo con otros materiales diferentes, en proporciones adecuadas, para obtener una mezcla con las características necesarias para llevar a cabo el proceso de compostaje. En la Tabla 4 se muestran las características deseables de la mezcla de materiales de partida para llevar a cabo el compostaje:

Tabla 4. Características deseables de las mezclas de los materiales de partida (Rynk et al., 1992).

Característica	Rango razonable	Rango preferido
Relación carbono/nitrógeno	20 - 40	25 - 30
Contenido en humedad	40 - 65%	50 - 60%
pH	5,5 - 9	6,5 - 8,5

Aunque la lista de materiales apropiados para el compostaje es interminable, en la Tabla 5 se recogen solamente algunos de ellos.

El *estiércol de vacuno* es un material rico en nitrógeno y muy húmedo. Su humedad y relación C/N van a depender de la cantidad de cama utilizada, de las prácticas de manejo, del tipo de operación y del clima. Generalmente, este residuo requiere su mezcla con materiales secos y ricos en carbono, con frecuencia son necesarios de dos a tres volúmenes de enmienda por volumen de estiércol. El riesgo de olores es relativamente bajo si se composta durante unas pocas semanas. Se descompone rápidamente.



Figura 7. *Distintos tipos de estiércol apilados antes de su compostaje.*

Cuando se utiliza estiércol líquido debe secarse a no ser que se utilice en pequeña proporción en la mezcla a compostar. En general, podría decirse que se trata de un buen material de compostaje.

Tabla 5. Composición de algunos materiales compostables (Rynk* et al.*, 1992).

Material		Contenido en humedad (%)	% nitrógeno	Relación C/N
Residuos de frutas	Rango	62-88	0,9-2,6	20-49
	Media	80	1,4	40
Huesos de aceitunas	Típico	8-10	1,2-1,5	30-35
Cáscara de arroz	Rango	7-12	0-0,4	113-1120
	Media	14	0,3	121
Residuos vegetales	Típico	-	2,5-4	11-13
Residuo matadero	Típico	10-78	13-14	3-3,5
Residuos de pescado	Rango	50-81	6,5-14,2	2,6-5,0
	Media	76	10,6	3,6
Esqueletos de pollo	Típico	65	2,4	5
Estiércol de gallina	Rango	22-46	1,6-3,9	12-15
	Media	37	2,7	14
Estiércol de vaca	Rango	67-87	1,5-4,2	11-30
	Media	81	2,4	19
Estabulada	Típica	79	2,7	18
Semi-estabulada	Típica	83	2,7	13
Estiércol Ovino	Rango	60-75	1,3-3,9	13-20
	Media	69	2,7	2,7
Purines	Rango	65-91	1,9-4,3	9-19
	Media	80	3,1	3,1
Basura (residuos alimentación)	Típico	69	1,9-2,9	14-16
Papel de uso doméstico	Típico	18-20	0,2-0,25	127-178
Lodos de depuradora de aguas residuales urbanas activos	Rango	72-84	2-6,9	5-16
	Típico	-	5,6	6
Lodos digeridos	Típico	-	1,9	16
Maíz de ensilado	Típico	65-68	1,2-1,4	38-43
Heno-general	Rango	8-10	0,7-3,6	15-32
	Media	-	2,1	-
Heno de leguminosa	Rango	-	1,8-3,6	15-19
	Media	-	2,5	16
Heno de no leguminosas	Rango	-	0,7-2,5	-
	Media	-	1,3	32
Paja general	Rango	4-27	0,3-1,1	48-150
	Media	12	0,7	80
Paja cebada	Rango	-	0,6-1,1	48-98
	Media	-	0,9	60
Paja trigo	Rango	-	0,3-0,5	100-150
	Media	-	0,4	127
Corteza maderas duras	Rango	-	0,10-0,41	116-436
	Media	-	0,241	223
Corteza maderas blandas	Rango	-	0,04-0,39	131-1285
	Media	-	0,14	496
Residuos de papel de periódico	Típico	3-8	0,06-0,14	398-852
Lodos industria papelera	Típico	81	0,56	54
Pulpa de papel	Típico	82	0,59	90
Serrín	Rango	19-65	0,06-0,8	200-750
	Media	39	0,24	442
Residuos maderas blandas	Rango	-	0,06-0,11	451-819
	Media	-	0,09	560
Residuos maderas duras	Rango	-	0,04-0,23	212-1313
	Media	-	0,09	641
Restos vegetales de jardinería urbana	Rango	-	2,0-6,0	9-25
	Media	82	3,4	17
Hojas	Rango	-	0,5-1,3	40-80
	Media	38	0,9	54
Poda de árboles	Típico	70	3,1	16

El *serrín* es un material, en general, con bajo contenido en humedad y alto contenido en carbono, su degradabilidad es de moderada a pobre. En general, es buen absorbente de humedad y olores. Normalmente está disponible a bajo coste. Se trata de un enmendante del compostaje de bueno a moderado.

Las *hojas* son relativamente secas y tienen un alto contenido en carbono. Presentan buena degradabilidad si están troceadas, su absorción de humedad es moderada. El riesgo potencial de producción de olores es bajo. Compostan solas o en mezcla como coadyuvantes. A menudo contienen deshechos, piedras, bolsas de plástico sobre todo si proceden de recogida urbana. Se trata de un producto muy estacional por lo que es necesario su almacenaje o manejo especial (distribución en el tiempo). Como material para ser utilizado para compostar es de bueno a moderado. Hay que tener en cuenta que los restos de poda de árboles y arbustos urbanos pueden contener residuos de plomo procedente del humo de los vehículos.

Las *astillas de madera* suelen ser un material seco y con alto contenido en carbono. Tienen gran tamaño de partícula, lo que proporciona una excelente estructura pero muy baja degradabilidad. En general, se utilizan como agente “bulking” (de relleno, para dar volumen) en el compostaje con aireación forzada. Debe separarse al final del compostaje pero puede utilizarse. Su coste es moderadamente bajo.

Un procedimiento para calcular la proporción entre las mezclas sería aplicando las ecuaciones siguientes (Fitzpatrick, 1993):

Los kg de residuo A (S) necesarios para mezclar por cada kg de residuo B para obtener una relación C/N determinada, serán:

$$S = \frac{(\text{C en 1 kg de B}) - (\text{relación C/N deseada}) \times (\text{N en 1 kg de B})}{(\text{N en 1 kg de A}) \times (\text{relación C/N deseada}) - (\text{C en 1 kg de A})}$$

$$\text{Contenido en humedad} = \frac{(\text{Agua en 1 kg de A}) \times \text{Peso A} + (\text{Agua en 1 kg de B}) \times \text{Peso B}}{\text{Peso A} + \text{Peso B}}$$

Donde: S = kg de residuo A.
C = contenido en carbono.
N = contenido en nitrógeno.

Las experiencias de compostaje realizadas en el Proyecto de Investigación (INIA-SC-96081) se llevaron a cabo con mezcla de estiércol de ovino y paja de cereal. Estos materiales se eligieron por su fácil disponibilidad, su abundancia y por ser materiales adecuados para su utilización posterior en agricultura ecológica. Los contenidos en carbono y nitrógeno del estiércol de ovino era del 44,9% y 2,6% respectivamente, mientras que los contenidos en carbono y nitrógeno de la paja de cereal eran de 47% y 0,6% respectivamente. La relación C/N inicial se ajustó entre 30-35 mezclando el estiércol con la paja en una proporción 2:1 en peso.

Ejemplo para los cálculos de las proporciones, contenido en humedad y relación C/N (recogido en Rynk *et al.*, 1992).

Supongamos que se quiere compostar gallinaza que normalmente tiene un contenido en humedad del 70%. Tanto la humedad como su contenido en nitrógeno es demasiado alta para que composte, necesita mezclarse con un material como el serrín que proporcionará a la mezcla una porosidad adecuada. La humedad, relación C/N y contenido en nitrógeno son 35, 500 y 0,11% respectivamente.

a) Cálculo de la proporción de cada uno de los ingredientes para obtener una humedad adecuada:

Peso de agua = peso total x contenido en humedad

Peso de materia seca = peso total – peso de agua

Peso de nitrógeno (N) = peso de materia seca x (%N/100)

Peso de carbono (C) = C/N x peso de nitrógeno

1 kg de estiércol húmedo contiene:

	Agua	0,7 kg
	Materia seca	0,3 kg
	N (0,3 x 0,06)	0,018 kg
	C (0,018 x 10)	0,18 kg

1 kg de serrín contiene:

	Agua	0,35 kg
	Materia seca	0,65 kg
	N (0,65 x 0,0011)	0,00072 kg
	C (0,00072 x 500)	0,36 kg

Para obtener en mezcla una humedad del 60%, 1 kg de gallinaza debe mezclarse con S kg de serrín:

$$\text{Contenido en humedad} = 60\% = 0{,}6 = \frac{0{,}7 + (0{,}35 \times S)}{1 + S}$$

S = 0,4 kg de serrín por cada kg de gallinaza.

La relación C/N sería:

$$C/N = \frac{\text{C gallinaza x Peso gallinaza + C serrín x Peso serrín}}{\text{N gallinaza x Peso gallinaza + N serrín x Peso serrín}} = \frac{0{,}18 + (0{,}4 \times 0{,}36)}{0{,}018 + (0{,}4 \times 0{,}00072)} = 17{,}7$$

La relación C/N es quizás un poco baja para realizar un compostaje y puesto que la humedad de mezcla es alta, 60%, se tendría que incrementar la proporción de serrín para aumentar la relación C/N de la mezcla.

b) Cálculo de las proporciones de la mezcla para una relación C/N adecuada:

Supongamos que queremos compostar paja de trigo (Humedad: 15%, relación C/N: 128 y contenido en nitrógeno: 0,3%) con la gallinaza del ejemplo anterior. Para calcular la cantidad de paja necesaria para mezclarla con la gallinaza y que la mezcla tenga una relación C/N de 25 tendríamos que realizar los siguientes cálculos:

1 kg de paja contiene:

Agua	0,15 kg
Materia seca	0,85 kg
N (0,85 x 0,003)	0,0026 kg
C (0,0026 x 128)	0,33 kg

Para obtener una relación C/N de 25, por cada kg de gallinaza:

$$C/N = 25 = \frac{0{,}18 + (S \times 0{,}33)}{0{,}018 + (S \times 0{,}0026)}$$

S = 1 kg de paja por cada kg de estiércol.

$$\text{El contenido en humedad sería} = \frac{0{,}7 + (1 \times 0{,}15)}{2} = 0{,}425 = 42{,}5\%$$

El contenido en humedad es bajo para iniciar el compostaje, con lo que habría que añadir agua directamente a la mezcla, o disminuir la cantidad de paja y aceptar una relación C/N menor.

4. SISTEMAS DE COMPOSTAJE

Los sistemas de compostaje tienen como finalidad facilitar el control y la optimización de parámetros operacionales, para obtener un producto final con la suficiente calidad, tanto desde el punto de vista sanitario como de su valor fertilizante. El acortamiento del tiempo del proceso, la disminución de los requisitos de espacio y energía y de la seguridad higiénica de la planta de tratamiento son también factores decisivos para el diseño de estos sistemas de compostaje.

Los sistemas utilizados se pueden clasificar en dos grupos: abiertos y cerrados (Tabla 6). En los primeros, el compostaje se realiza al aire libre, en pilas o montones, mientras que en los segundos, la fase de fermentación se realiza en reactores.

Los sistemas abiertos son los más utilizados en USA, mientras que los sistemas en fermentador son denominados con frecuencia "europeos" en razón de su origen.

Tabla 6. Sistemas de compostaje (Gasser, 1984).

SISTEMAS ABIERTOS	
Apilamiento estático	- con aire por succión - con aire soplado en conjunción con control de temperatura - ventilación alternante (succión y soplado) y control de temperatura
Apilamiento con volteo Apilamiento con volteo y aireación forzada	
SISTEMAS CERRADOS	
Reactores verticales	- Continuos - Discontinuos
Reactores horizontales	- Estáticos - Con rotación

4.1. Sistemas abiertos

Los sistemas abiertos son los sistemas tradicionales de compostaje. Los sustratos a compostar se disponen en montones o pilas que pueden estar al aire libre o en naves. La aireación de la masa fermentable puede hacerse por volteo mecánico de la pila o mediante ventilación forzada. Esta última tiene la ventaja de permitir el control del nivel de oxígeno, así como de la humedad y de la temperatura. Además, supone menores costes y necesidades menores de espacio, evitándose los inconvenientes del volteo de las pilas. Los sistemas más utilizados son los siguientes:

a) Compostaje en pilas estáticas con aireación natural:

Es el sistema más antiguo que se conoce y se realiza en pilas, de altura reducida, y no se mueven durante el compostaje. La ventilación es natural a través de los espacios de la masa a compostar. Las dimensiones de los montones pueden estar en función de los equipos utilizados para compostar, pero para este sistema, no interesa que sean más altos de 1,5 m, con una anchura en su base de unos 2,5-3 m, de la longitud deseada y de frente triangular, debiendo presentar mayor pendiente en los lugares o épocas más lluviosas.



Figura 8. *Los montones excesivamente altos (mayores de 1,5 m) no son adecuados para un buen compostaje.*

b) Compostaje en pilas estáticas con ventilación forzada:

La pila de fermentación es estática y en su formación se ha dispuesto un sistema mecánico de ventilación por tuberías perforadas o por un canal empotrado en la solera. Las tuberías se conectan con un ventilador que asegura la entrada de oxígeno y la salida de CO_2. Esta ventilación puede hacerse por succión o inyección de aire o bien mediante sistemas alternantes de succión e inyección. Con el sistema de succión, que es el empleado, por ejemplo, en el método Beltsville (Figura 9) en el compostaje de lodos de depuradora con astillas de madera, un flujo de aire de alrededor de 0,2 m^3/min/t a la entrada del succionador es suficiente para alcanzar una concentración de oxígeno del 15%. Con el fin de reducir los problemas de olores, el aire se pasa a través de una pila de compost maduro que actúa como filtro.

En el método Rutgers la aireación se consigue por succión con control de la temperatura, de esta forma al mismo tiempo que se aporta el oxígeno necesario se controla la temperatura. Este sistema tiene dos ventajas sobre el anterior: produce, por la evaporación que ocasiona, una baja humedad del producto final, garantizando una buena estabilidad; por otra parte, el control automático de temperatura evita períodos prolongados de temperatura elevada. Si bien una temperatura elevada inhibe la población microbiana, tiene, sin embargo, un efecto positivo sobre la reducción de patógenos. Por este motivo, hay sistemas que incluyen una fase inicial de succión de aire, que permite elevar la temperatura en pocos días, después la corriente de aire se invierte y se introduce en la masa, junto con un control de temperatura y se continúa el proceso.

c) Compostaje en pilas por volteo:

Aunque es un sistema muy utilizado porque es muy simple, tiene una serie de limitaciones. En primer lugar, la pila es oxigenada tan sólo periódicamente. Requiere, en general, más espacio y el control higiénico es más difícil. El tamaño de la pila fermentable es mayor que en el caso anterior, permitiendo alturas en torno a 2,5 m. La frecuencia del volteo depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que interesa que sea realizado el proceso. En la actualidad las nuevas tendencias se orientan hacia los sistemas de compostaje por volteo forzado por medio de volteadoras con control automático. El tiempo de fermentación o de estancia en el parque de volteo suele ser de dos a cuatro semanas, transcurrido este tiempo el compost deberá pasar al parque de maduración antes de proceder a su refino y depuración.



Figura 9. *Pilas de compost aireadas artificialmente a través de tuberías perforadas y aspiración de aire (en Costa* et al*., 1991).*

En el marco del Proyecto de Investigación (INIA-SC-96081) se realizó un estudio sobre compostaje utilizando diferentes métodos de aireación en sistemas abiertos. Como sistema de aireación natural se utilizó un sistema de rejillas en forma de zig-zag, de tal manera que el aire que entra en el espacio inferior vacío penetra en la pila, pasando a ocupar el lugar dejado por el aire caliente que, por convección, pasa a la atmósfera (Figura 10). Este sistema, aunque eficaz, presentaba una serie de inconvenientes, entre los que cabe destacar la compactación de la pila que se producía a medida que progresaba el compostaje, dificultando la aireación de la misma. Además, debía tenerse especial cuidado para que la aireación no fuera excesiva y por tanto pudiera producir un enfriamiento de la pila,

para ello se procedía a tapar o destapar las entradas de los canales que deja la rejilla en función de la temperatura registrada en el interior de la pila. Como sistema de aireación forzada se utilizó un sistema de tuberías perforadas protegidas por un sistema de drenaje para evitar que se obturaran los agujeros de la tubería, las tuberías iban conectadas a una soplante con una capacidad de 450 m^3 aire/h. La utilización de este sistema acortaba el proceso de compostaje en varias semanas, si bien, presentaba el mismo problema de compactación de las pilas que el caso anterior. Por último, el compostaje con aireación por volteo fue el más largo y en el que se produjeron mayores pérdidas de nitrógeno, acrecentándose estas pérdidas debido al elevado pH de la mezcla utilizada para compostar. Las características de los productos obtenidos por cualquiera de los tres sistemas utilizados fue similar.

4.2. Sistemas cerrados

Estos son los sistemas que podríamos llamar industrializados, puestos en marcha por entidades públicas o privadas y que generalmente se utilizan para compostar residuos en las proximidades de ciudades de tamaño medio o grande.



Figura 10. *Pila estática de compostaje de estiércol ovino y paja.*

En estos sistemas, como ya hemos mencionado anteriormente, la fase inicial de fermentación se realiza en reactores que pueden ser de dos tipos: horizontales o verticales, mientras que la fase final de maduración se hace al aire libre o en naves abiertas. Son sistemas desarrollados para reducir considerablemente las superficies de compostaje y lograr un mejor control de los parámetros de fermentación y controlar los olores de forma más adecuada.

Aunque estos sistemas requieren costos de instalación superiores a los anteriores, presentan la ventaja de ser más rápidos y por tanto requerir menos espacio.

Entre estos sistemas podemos destacar:

a) Fermentadores verticales:

Los reactores verticales pueden operar de forma continua o discontinua. En el primer caso, el material a compostar se encuentra en forma de masa única, mientras que en el segundo caso, la masa en compostaje se sitúa en distintos niveles.

En los sistemas cerrados continuos se utilizan reactores de 4-10 m de altura, con un volumen total de 1000 a 3000 m^3 (Figura 11). El bioreactor consta de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. El material se introduce por la parte superior mediante un tornillo alimentador. A medida que se va extrayendo el material compostado, el material fresco va descendiendo. El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (éstos son aspirados por la parte superior del reactor). El tiempo de residencia es de 2 semanas.



Figura 11. *Reactor cilíndrico (Saña y Soliva, 1987).*

Los reactores verticales discontinuos constan de un depósito cilíndrico de grandes dimensiones dividido en varios niveles (cada nivel tiene de 2 a 3 m de altura).

La materia a compostar se coloca en el piso más alto y mediante dispositivos mecánicos se voltea la masa a la vez que va descendiendo al piso inferior. La humedad requerida para llevar a cabo el proceso se consigue o bien por evaporación del agua del material situado en los niveles inferiores, la cual se encuentra a una mayor temperatura, o bien se dispone de sistemas de suministro de agua. Cuando la fracción orgánica ha descendido al último piso se da por concluida la fermentación y el compost sale al parque de maduración.

El tiempo en el fermentador es de una semana. El inconveniente de este tipo de reactores es el elevado coste de instalación y de mantenimiento de la planta.

Otra variante de reactor vertical es el reactor circular (Figura 12). Los que existen actualmente tienen un diámetro de 6 a 36 metros y una altura de 2 a 3 metros. El material a compostar se introduce por la parte superior del reactor, y la masa se voltea mediante un brazo giratorio, la salida del material se realiza por el centro de la base. La aireación se realiza por la parte inferior. El tiempo de retención es de 10 días, transcurridos los cuales pasan al parque de maduración.

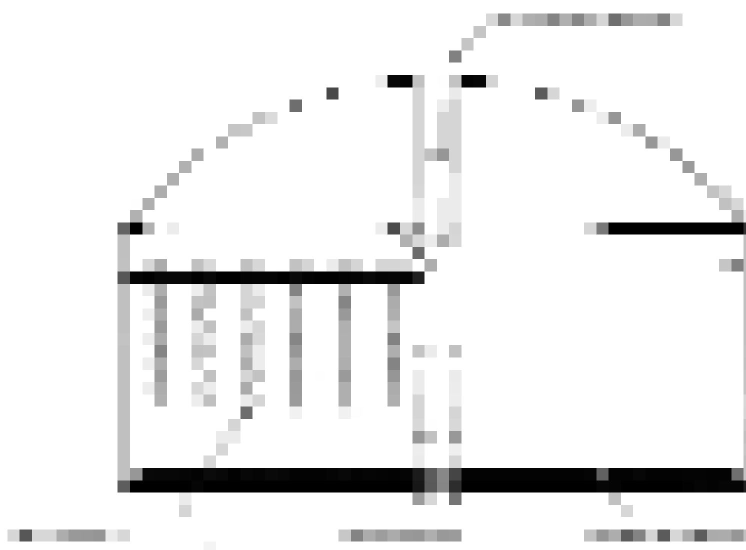


Figura 12. *Reactor circular dinámico (Saña y Soliva, 1987).*

b) Reactores horizontales:

Bioestabilizador DANO. Estos reactores consisten en un cilindro horizontal que suele tener de dos a tres metros de diámetro y giran a una velocidad de 2 rpm a lo largo de su eje longitudinal. El proceso consiste en un tratamiento mecánico continuo, el tiempo de permanencia de los residuos dentro del fermentador es de 24-36 horas durante el cual la materia orgánica es físicamente separada del resto de componentes, al mismo tiempo que se inicia el proceso de degradación microbiana. En estos reactores no se produce un auténtico compostaje sino una fase de preparación del substrato de tipo físico-químico. El material resultante es compostado finalmente en pilas o en el reactor.

Reactores horizontales propiamente dichos: en ellos el material generalmente preseleccionado (separación de inertes) se somete al proceso de compostaje durante 15 a 30 días en condiciones estáticas (reactor túnel) o de volteo periódico (reactor rectangular dinámico). Dentro de este grupo los reactores de túnel, los que están en servicio tienen forma de caja rectangular de 4 m de altura, 5,5 m de ancho y longitud variable según el volumen a tratar. La agitación se logra mediante sistemas hidráulicos y la aireación se realiza por sistemas situados en la parte inferior. El tiempo de retención es de 14 días y el producto requiere generalmente un tratamiento posterior.

El reactor rectangular tiene forma de caja rectangular de 3 m de altura y 6 m de ancho, y longitud variable según las necesidades. El material es descargado por la parte superior, y con un dispositivo que penetra en el reactor, parecido a una fresa de un reactor, se mezcla y se descarga en otra zona del reactor mediante una cinta transportadora y una grúa móvil. Con el mismo sistema se extrae el material una vez compostado. La aireación se realiza por la parte inferior. El tiempo de retención es de 14 a 21 días y normalmente no necesita un tratamiento posterior.

Finalmente, y a modo de resumen, en la Tabla 7 se exponen bajo diferentes criterios las características más relevantes que presentan los sistemas abiertos y los sistemas cerrados por considerarlos interesantes a la hora de realizar una elección entre ambos tipos de sistemas.

Tabla 7. Cuadro comparativo entre los sistemas de compostaje (Mustin, 1987).

Elemento de comparación	Tamaño en sistemas abiertos	Tamaño en sistemas cerrados
Superficie	Grande	Reducida
Clima	Temperaturas no extremas	Variable y frío
Sustrato	Todos, pero con agentes estructurantes	Principalmente aquellos con elevada humedad
Tecnología	Relativamente sencilla. Sistemas de aireación 2 opciones: aireación forzada y volteo	Relativamente sofisticada Sistemas de aireación: múltiples opciones
Sistema	Discontinuo a semicontinuo	Semicontinuo a continuo
Inversiones	De baja a moderada	De elevadas a muy elevadas
Costes de explotación	Variable. Elevada en el caso de utilización de agentes estructurantes	Elevado
Consumo energético	Bajo a medio	Medio a elevado
Mano de obra	Variable, según la instalación: mano de obra no especializada + formación + 1 técnico	Obrero especializado + técnico
Duración	Fermentación: semanas Maduración: meses	Fermentación: 3 a 15 días Maduración: meses
Tamaño	Todos: pequeñas producciones: < 12 TMS/día > 300 TMS/día	Limitado: - 70 TMS/día - 73 TMS/día
Olores	Problema si: -no hay suficiente aireación -volteos alargados en el tiempo	Se puede controlar según sistema de aireación

5. OPERACIONES DE COMPOSTAJE

El proceso de compostaje requiere toda una serie de operaciones, algunas de las cuales se repiten a intervalos a lo largo de todo el proceso. Las operaciones que se requieren se pueden dividir en:

5.1. Operaciones primarias

5.1.1. Recogida y transporte

Generalmente, el compostaje comienza con la recogida de materiales orgánicos adecuados que se transportarán hasta el sitio donde se vaya a realizar y que se mezclarán hasta conseguir una humedad y una relación C/N adecuadas. Las materias primas de tipo estiércol necesitan una atención inmediata porque rápidamente sufren fermentación anaerobia dando lugar a malos olores. Sin embargo materiales tales como paja, astillas, hojas y serrín se descomponen mucho más lentamente debido a su alto contenido en carbono y baja humedad y por esta razón pueden almacenarse durante largos periodos de tiempo antes de que comiencen a degradarse. Si estuvieran húmedos comenzarían a compostar pero debido a su bajo contenido en nitrógeno lo harían a una velocidad despreciable.

5.1.2. Mezcla y construcción de la pila

a) Materiales sólidos:

La etapa fundamental de todo compostaje es mezclar los materiales en las proporciones adecuadas y colocar la mezcla en forma de pila o cargar el reactor si es que el compostaje se va a efectuar en sistema cerrado, en este último caso la etapa de mezcla no es necesaria ya que está incluida en el sistema. La mezcla y la formación de la pila se pueden realizar de distintas maneras, dependiendo del método de compostaje utilizado, del equipo disponible y del manejo del estiércol que se haya hecho en la granja. La maquinaria requerida para estas operaciones es convencional (cintas transportadoras, palas mecánicas, remolques esparcidores, equipos combinados, etc.).

La pala mecánica es un equipo muy común en una granja. Con ella y con el remolque esparcidor de estiércol se pueden realizar prácticamente todas las tareas, tanto la mezcla como la formación de la pila. Cuando se trata de pilas aireadas con volteo o con aireación pasiva, la mezcla y la formación se realizan en una sola etapa, sin embargo, cuando las pilas son de aireación forzada la mezcla y la formación han de hacerse por separado debido a las tuberías que van por la base de la pila.

También se pueden utilizar mezcladores tipo hormigonera alimentados lateralmente mediante una cinta transportadora, que incluso se pueden montar sobre un camión evitándose así el uso posterior de camiones o esparcidores (Figura 13).

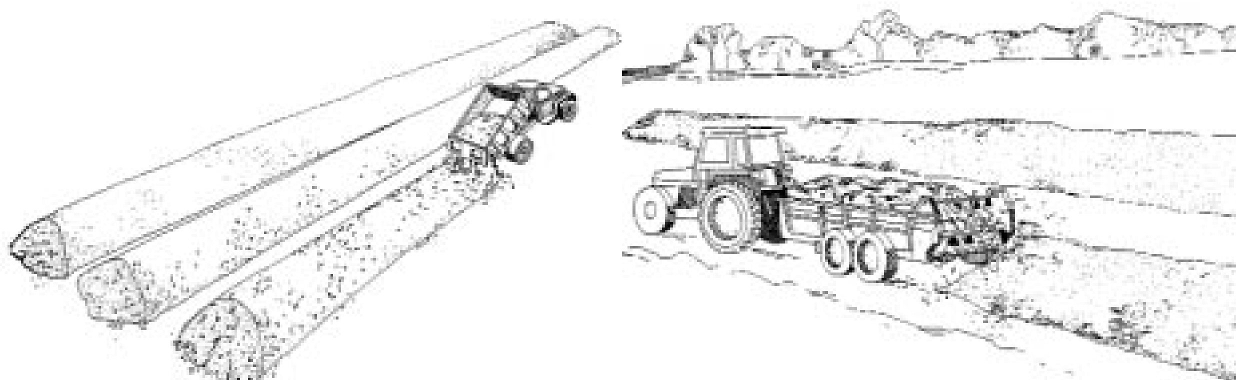


Figura 13. *Formación de pilas de compostaje en hileras (Rynk et al., 1992).*

Existen, además, otras máquinas que han sido probadas para compostar lodos de depuradora, tales como las amasadoras que utilizan palas rotatorias para mezclar los materiales, que son capaces de trabajar en continuo y son más rápidas que los mezcladores en discontinuo ya que la alimentación es continua. Sin embargo, en este tipo de máquinas los ingredientes han de suministrarse al mezclador en las proporciones adecuadas y además carecen de la movilidad de los mezcladores en discontinuo.

También se han utilizado, con diferentes resultados, mezcladores cilíndricos rotatorios para la construcción de pilas de lodos de depuradora y astillas. La acción rotativa del mezclador puede dar lugar a la formación de bolas de lodo cuando la velocidad es baja y si la velocidad es muy alta pueden aparecer depósitos de lodo pegados a las paredes del cilindro. Sin embargo, con respecto a los estiércoles y otros materiales de granja, no existe ninguna información.

En nuestro caso, en la preparación de la mezcla de estiércol de ovino con paja de cereal para proceder a su compostaje, y dada la tendencia del estiércol de ovino a formar “aglomerados”, nos resultó de gran utilidad el paso del tractor sobre el residuo mientras se realizaba la mezcla consiguiéndose de esta forma una mayor homogeneidad.

b) Materiales líquidos:

Los materiales líquidos presentan problemas especiales de manejo pues se han de incorporar a la mezcla de compostaje sin que ésta se encharque. Además, muchos líquidos representan un problema adicional debido a su olor. Entre los materiales líquidos más utilizados se encuentran los purines, los residuos del procesado de industria pesquera, los residuos de industrias lácteas así como pequeños volúmenes de aguas de lavado. Estos residuos líquidos podrían ser residuos primarios o material secundario siempre que el sistema de compostaje sea capaz de absorberlos. Ocasionalmente, se puede añadir líquido a una pila de compostaje cuando se necesite mantener una humedad adecuada, lo cual supone una buena alternativa para la utilización de ciertos residuos líquidos diluidos, tales como aguas de lavado de centrales lecheras o los propios lixiviados de la planta de compostaje previamente recogidos en fosas apropiadas.

En cualquier caso, los otros materiales que se van a compostar deben ser lo suficientemente absorbentes para retener todo el residuo líquido añadido sin que se sacrifique su porosidad. Generalmente

se requiere la adición de grandes cantidades de materiales de tipo serrín, turba, papel o compost reciclado.

Si el volumen de residuo líquido es pequeño se puede añadir durante el mezclado inicial, sin embargo, si la cantidad que se va a añadir es tan grande que humedecería demasiado la mezcla, el residuo líquido se debería añadir de forma regular a lo largo del proceso a medida que la mezcla pierda humedad. Esto se puede hacer con una máquina para estiércoles líquidos, con un esparcidor de estiércol o bien con tanques esparcidores. Naturalmente, se necesita dar un volteo inmediatamente después de la adición del residuo líquido. Con objeto de evitar que el líquido escurra por los lados de la pila es necesario hacer un surco en la parte superior donde se deposita el líquido. Si el líquido es maloliente lo mejor es meterlo en el interior de la pila antes del volteo, para este fin existen unos aparatos que se montan en un lateral del tractor y que inyectan el líquido dentro de la pila.

5.1.3. Posibilidades de utilización de estiércoles fluidos (purines)

Entendemos por estiércoles fluidos (purines), los residuos ganaderos procedentes de las explotaciones porcinas y bovinas, principalmente, que poseen un elevado contenido en humedad (entre el 65 y 91%) y un alto contenido en materia orgánica y nutrientes minerales. Su composición varía en función de la especie, edad, características de explotación y de alimentación de los animales de que procede, pero, en general, se mantiene bastante constante dentro de cada tipo. Presentan la ventaja de no contener materiales indeseables, y para su uso deberemos valorar el contenido (cada vez menor) de metales pesados, sobre todo cobre y cinc.

Actualmente nadie pone en duda el valor fertilizante de estos residuos que, bien gestionados, pueden alcanzar la categoría de subproductos.

La utilización de purines como fertilizantes o enmiendas orgánicas, exige unas normas de manejo y una aplicación e incorporación al suelo medioambientalmente correctas (Informaciones Técnicas del Centro de Técnicas Agrarias del Gobierno de Aragón núms. 3/93, 5/93, 1/95, 10/96 y 31/97 y Navarra Agraria núms. 115, 116 y 117 de 1999). Dado que es un producto rico en nitrógeno, lo adecuado sería hacer una incorporación superficial al suelo mezclado con restos lignocelulósicos, preferiblemente buscando la relación idónea para el compostaje que sería C/N = 30, tal y como se ha expuesto anteriormente, procurando hacer su incorporación al suelo dentro de las 24 horas siguientes a su aplicación. Los aperos adecuados para ello pueden ser las gradas, fresas, arados de disco, etc.

Esta técnica es la conocida como “compostaje en superficie”, aunque en realidad no se trata de un compostaje, hacemos una breve referencia dado que es una práctica bastante frecuente. Los residuos sufrirán una descomposición similar a la de la pila, pero con mayor lentitud, sin elevación de temperatura ni absorción de nitrógeno del suelo para su descomposición, contando además con la ventaja de ser una aplicación muy económica. La dosis estaría en función de la cantidad de residuos existentes en la parcela y de las necesidades del cultivo a implantar, debiendo ser como máximo la equivalente a 210 kg de nitrógeno por hectárea y año. En las zonas declaradas como “vulnerables”, las dosis serán de 210 o 170 kg por hectárea y año dependiendo del momento de su declaración. En el momento de su aplicación también habrá que valorar las características de los suelos y las épocas de aplicación, no siendo adecuadas aquellas de bajas temperaturas, altas pluviometrías y ausencia o baja actividad radicular en cultivos establecidos. El impacto ambiental de la aplicación de purines disminuye considerablemente usando equipos de tubos colgantes o de inyectores acoplados a las cubas esparcidoras. A pesar de lo expuesto, las aplicaciones de purines deberán responder a las normas contenidas en los Códigos de Buenas Prácticas Agrarias promulgados por las CC.AA.

5.1.4. Compostaje de purines

Dadas las características del subproducto (alta humedad, alto contenido en nitrógeno y relación C/N baja), si no se utiliza en plantas de biogas para generar energía, se puede proceder de varias formas: En periodos cálidos se puede forzar la evaporación de parte del agua que contienen, depositándolos en balsas de bastante superficie y poca profundidad. Para ello es deseable que los purines hayan sido tratados con complejos bacterio-enzimáticos (para evitar olores) preferiblemente en las explotaciones y cuando hayan perdido humedad proceder con el residuo sólido a su compostaje.

En cualquier época del año se pueden compostar añadiéndoles otros residuos lignocelulósicos u otros estiércoles para absorber su humedad y equilibrar la relación C/N.

Un método que se está usando en las principales zonas productoras de porcino y bovino de Italia es la separación de las fracciones sólido-líquido mecánicamente. El tamaño de las partículas sólidas que no pasan en suspensión a la fracción líquida es el mayor de 0,1 mm. La fracción líquida (de reducidos contenidos en nitrógeno y potasa) puede ser aplicada directamente sobre los cultivos ya que prácticamente ni ensucia ni quema las hojas o también puede ser introducida en los sistemas de riego a presión. Sobre la fracción sólida se actúa haciendo compostaje según los métodos expuestos.

5.1.5. Rendimientos del compostaje

Este dato puede ser importante para conocer el dimensionamiento de la planta de elaboración. Se han efectuado estudios utilizando distintos materiales ricos en nitrógeno y lignocelulosas haciendo evaluaciones y análisis de los montones durante unos 90 días, sobre los compost brutos y refinados, llegando a la conclusión de que el compostaje es la técnica óptima de aprovechamiento de los residuos orgánicos, actuando sobre su revalorización y las pérdidas del proceso se sitúan próximas al 50% tanto en peso como en volumen.

5.1.6. Maduración y almacenaje

a) Maduración:

A continuación de la fase activa se requiere un periodo de al menos un mes para que el proceso termine y para que el compost desarrolle las características deseadas para sus posteriores aplicaciones. Generalmente, este periodo de maduración se lleva a cabo en una zona diferente al sitio donde se ha realizado la fase activa del compostaje, no obstante, la maduración se puede realizar en el mismo sitio y en la misma pila donde ha tenido lugar la fase activa (Figura 14).

Dado que las pilas en maduración están sufriendo una ligera descomposición, es necesario seguir manteniendo las condiciones aerobias, ya que en condiciones anaerobias se producen malos olores y compuestos tóxicos para las plantas. Si bien en esta etapa no se requieren volteos ni aireación forzada, las pilas en maduración deben ser lo suficientemente pequeñas para permitir un adecuado intercambio de aire en su interior, sobre todo si la aplicación que se le va a dar requiere productos de alta calidad (utilización como sustrato).

Las condiciones anaerobias también se pueden dar por una excesiva humedad o por una acumulación de agua en la base de la pila. Debido a que las pilas en fase de maduración no producen suficiente calor como para dar lugar a que haya una pérdida de agua por evaporación, la zona de maduración debe estar bien drenada con canalizaciones para recoger el agua de lluvia y evitar que se acumulen en el sitio donde están las pilas.



Figura 14. *Pilas de compostaje en fase de maduración.*

El método más efectivo para corregir la humedad o las condiciones anaerobias es volverla a mezclar y extenderla sobre una superficie abierta. De esta manera, se introduce oxígeno en la pila y los compuestos anaeróbicos se descomponen aeróbicamente o bien se evaporan.

En el curso de la maduración las sustancias húmicas evolucionan, no sólo cuantitativa sino también cualitativamente, con el predominio, a medida que transcurre el proceso, hacia compuestos de elevado peso molecular (ácidos húmicos) sobre aquellos de peso molecular más bajo (ácidos fúlvicos). La valoración entre las diversas fracciones, así como la relación existente entre ellas, resulta un importante índice de evolución del proceso y de la madurez del compost final.

b) Almacenaje:

Dado que el uso y la venta de compost son generalmente estacionales, con picos en determinadas épocas, como en primavera y otoño, es necesario almacenar el compost durante periodos comprendidos entre los tres y seis meses. Los compost acabados que se han dejado madurar adecuadamente, todavía tienen, aunque baja, cierta actividad microbiana, por lo que se deben evitar, en lo posible, condiciones que aumenten el riesgo de crear condiciones anaerobias. La altura de las pilas no debe superar los 4 metros, ya que a medida que aumenta la altura, se incrementa el riesgo de que pueda tener lugar una combustión espontánea. En caso de que las pilas estén húmedas o desarrollen anaerobiosis, se pueden utilizar las medidas recomendadas para las pilas que están en maduración. En general, una práctica segura es desmontar las pilas grandes y hacer varias de menor tamaño unas semanas antes de su utilización o venta.

5.2. Operaciones secundarias

5.2.1. Molienda, tamizado y separación

La mayoría de las materias primas que se usan para compostar no requieren molienda ni tamizado, sobre todo si el sistema que se va a utilizar es el de pilas con volteo; no obstante, hay materiales, como los residuos de poda, que por su gran tamaño necesitan ser troceados.

Ocasionalmente, algunas materias primas necesitan una separación previa al compostaje, tal es el caso de los residuos de establo que pueden contener bolsas de plástico, hojas, pajas o restos de basura. En general, la selección se hace a mano salvo cuando los materiales indeseables están en gran cantidad, en cuyo caso se hace necesario una separación mecánica. Si el material indeseable no es perjudicial para el compostaje la separación mecánica se puede dejar para el final.

También es necesario hacer una separación al final del compostaje cuando se quiere recuperar el agente “bulking” (de relleno) en los casos en que este material se haya utilizado. Normalmente, esta operación se realiza siempre que se quiera mejorar la calidad del producto final.

Para que la separación sea más efectiva, el material ha de tener una humedad inferior al 45%. Alguno de los modelos de separadores consta de una picadora y un mezclador. Las picadoras incluyen cintas vibradoras o martillos que rompen los aglomerados del material antes de que éste sea separado. Los mezcladores pueden añadir fertilizantes o arena según el uso a que se vaya a destinar el producto final.

Existen muchos tipos de separadores, la elección de uno u otro tipo dependerá de la clase de materiales, del contenido en humedad, de los costes y de la utilización ulterior del producto obtenido. Entre las diferentes clases de separadores se encuentran los cribadores, los vibradores, los discos onduladores, los de barreno y los giratorios.

5.2.2. Secado

Un compost húmedo es indicativo de que la mezcla de partida tenía una humedad muy alta, que en la fase activa del proceso no se ha alcanzado la temperatura adecuada, que los volteos no han sido suficientemente frecuentes, que el sitio donde se ha realizado no estaba bien drenado o que el clima ha sido demasiado frío y lluvioso. En general si el proceso de compostaje se ha llevado a cabo correctamente no es necesario recurrir al secado

Es absolutamente necesario que el compost esté seco sobre todo si se va a utilizar como sustrato o va a ser envasado en sacos. Una buena práctica es producir un compost con un contenido en humedad comprendido entre el 35 y el 45%, teniendo en cuenta que por debajo del 45% mejora mucho su manejo y que por encima del 35% se minimiza la producción de polvo.

En los sistemas de compostaje, el secado implica una aireación extra o una prolongación del periodo de compostaje. Una buena alternativa, cuando el clima es caluroso y seco es extender el compost en una capa fina encima del terreno y dejarlo secar de una forma natural, si bien esto dependerá de la superficie disponible.

5.2.3. Empaquetado

El compost empaquetado es más caro que el compost a granel y además es más atractivo para posibles clientes. Si las bolsas son pequeñas no se necesita un equipo especial, es suficiente un embudo, para facilitar su llenado a mano y un sellador. Si el compost se va a empaquetar en bolsas de plástico su contenido en humedad ha de ser como máximo del 35% ya que de lo contrario, seguirá descomponiéndose y fermentará.

6. CONDICIONES DE UBICACION Y CONSIDERACIONES MEDIO-AMBIENTALES

A la hora de hacer un compostaje hay que tener en cuenta una serie de consideraciones de tipo medioambiental, entre otras:

6.1. Elección del emplazamiento

El sitio elegido para realizar el compostaje deberá ser de fácil acceso, situado de tal manera que el transporte de los materiales no sea de largo recorrido y tendrá una superficie firme que soporte el tránsito de vehículos bajo diversas condiciones climatológicas (Ver Figura 14). Generalmente, en una granja el sitio más adecuado es cerca del estercolero. Sin embargo, la conveniencia de un sitio determinado debe sopesarse frente a factores tales como el área disponible, la proximidad a núcleos de población, la visibilidad y el control de los lixiviados. El mejor sitio en una granja puede no ser el más conveniente. Se deberán evitar emplazamientos cercanos a escuelas, hospitales, así como a sitios residenciales y se procurará que queden fuera de la vista.

A la hora de diseñar una instalación de compostaje hay que realizar un estudio previo en el que se incluyan factores tales como la dirección predominante del viento, el fácil acceso a vías de tráfico, los usos a que se dedican las tierras colindantes, el desnivel del terreno, los patrones de escorrentía, así como la localización de humedales u otros sistemas acuáticos.

6.2. Distancia de separación

Es importante que exista una zona de amortiguación o distancia de separación entre una instalación de compostaje y los acuíferos y los núcleos de población vecinos para mantener un control de la calidad del agua y evitar factores molestos tales como malos olores y ruidos de la maquinaria.

En la Tabla siguiente se dan algunas distancias recomendadas basadas en trabajos publicados y en regulaciones medioambientales existentes. No obstante, estos valores son orientativos y en cada caso dependerán del tipo de material que se vaya a compostar así como de la reglamentación medioambiental existente en el área de aplicación.

Las distancias reflejadas en la Tabla 8 son medidas en horizontal cuando se trata de aguas superficiales y en vertical para aguas subterráneas.

Tabla 8. Distancias de seguridad del área de compostaje a zonas sensibles (Rynk** et al.**, 1992).

Area sensible	Distancia de separación mínima (metros)
Residencias o parques empresariales	15-30
Pozos privados u otras fuentes de agua potable, humedales o aguas superficiales (ríos, lagos, etc.)	60-150
Aguas subterráneas	7
Capa freática	0,6-1,5
Lecho de roca	0,6-1,5

6.3. Requisitos de desagüe

Para que un sitio sea adecuado para el compostaje uno de los requisitos que ha de cumplir es que tenga un buen drenaje. Emplazamientos con mal drenaje dan lugar a encharcamientos, a materiales de compostaje saturados de agua, a sitios fangosos que dificultan las labores de equipos y operarios y a una excesiva producción de lixiviados. Idealmente, el sitio debe tener pocas piedras ya que éstas podrían mezclarse con los materiales a compostar y producir daños en la maquinaria. Si las condiciones del suelo no son aceptables es suficiente una compactación de grava o arena para evitar problemas de encharcamientos y facilitar las labores de la maquinaria así como las de mantenimiento. Sólo se requerirá una superficie impermeable en caso de suelos con buen drenaje y con la capa freática muy alta (1-1,5 m). Las superficies asfaltadas sólo son necesarias en determinados casos, para almacenar materiales húmedos o cuando se usa cierta maquinaria pesada, de lo contrario encarece demasiado el proceso.

Para evitar que se formen charcos de una manera permanente, la inclinación del terreno en el sitio de compostaje ha de ser como mínimo de un 1%, aunque lo ideal es entre 2 y 4%. Sitios con pendientes superiores a 7% no son aconsejables, pues además de requerir mayor vigilancia de los lixiviados necesitan control de la erosión del suelo.

Las pilas de compost han de ir en paralelo a la pendiente del terreno, para así evitar que haya acumulación de lixiviados en la parte alta de la pila.

El sitio debe estar nivelado para evitar que el manejo de los lixiviados de lugar a una erosión del terreno. Los lixiviados deben ser conducidos a los pastos o a las tierras de cultivo o a una fosa colectora donde se almacenen para su uso posterior.

6.4. Consideraciones medioambientales

Desde el punto de vista medioambiental la elección de un sitio de compostaje estará influenciada por el método de compostaje que se vaya a utilizar y por los materiales que vayan a ser usados, evitándose en lo posible la producción de malos olores, de polvo, de ruido y de lixiviados.

En lo referente a los olores, éstos se minimizan con un buen manejo del sistema. Además, a la hora de elegir el sitio hay que tener en cuenta la dirección preferente de los vientos durante las estaciones más calurosas.

En cuanto a los ruidos y a la producción de polvo resultantes tanto de las operaciones de compostaje como de los vehículos utilizados para el transporte hay que procurar hacer una planificación a lo largo del día y en las carreteras que se vayan a utilizar. El triturado de los materiales es una operación muy ruidosa que se deberá realizar cuando el ruido tenga el menor impacto posible. Los ruidos aumentarán a medida que el tamaño de la instalación sea mayor. Dependiendo del tipo de material a compostar o del tipo de empresa, los ruidos pueden llegar a ser sólo un factor estacional. Hay que prestar especial atención durante el verano ya que en esta estación las ventanas de las viviendas permanecen más tiempo abiertas y los vecinos están más tiempo fuera de sus casas.

En orden a evitar quejas, es conveniente que los sitios de compostaje estén lo menos a la vista que se pueda, para ello se sacará ventaja del paisaje natural, árboles, arbustos, etc. Si el sitio está a la vista del público hay que procurar que esté lo más limpio posible. Un buen consejo es mantener el sitio lo más atractivo posible con césped, plantas a su alrededor, evitando las malas hierbas que siempre dan una imagen descuidada y pueden ser foco de contaminación del propio compost.

El control de la contaminación exterior es, sin duda, el factor más importante. El agua sirve como vehículo para eliminar contaminantes potenciales. La lluvia y la nieve pueden percolar dando lugar a la formación de lixiviados que pueden llevar compuestos contaminantes. Por tanto, hay que tratar de minimizar la producción de estos lixiviados. Entre los posibles contaminantes que se pueden producir durante un compostaje de residuos agrícolas están el nitrógeno en forma de nitrato y en forma de amonio, así como compuestos orgánicos que se producen durante los procesos de descomposición. Si bien el nitrato puede ser un serio contaminante puesto que alcanza las aguas subterráneas, éste se produce en concentraciones despreciables durante la fase activa de un compostaje, debido en parte a las altas concentraciones de carbono de la mayoría de las mezclas que se utilizan para compostar y a que las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso inhiben el crecimiento de los microorganismos

nitrificantes. Por el contrario, no ocurre lo mismo en las pilas almacenadas y en proceso de maduración que son una fuente potencial de nitratos.

La materia orgánica y el amonio pueden dar lugar a contaminación de las aguas superficiales debido a su consumo de oxígeno, lo que comúnmente se refiere como DBO o DQO (demanda biológica o química de oxígeno).

La presencia de pesticidas en los residuos de cosechas o de metales pesados en otro tipo de residuos tienen, normalmente, mayor impacto en la calidad del compost que en la contaminación del emplazamiento, pero puede haber otra clase de contaminantes procedentes de diferentes residuos, por eso es importante conocer la naturaleza de los residuos que se van a compostar.

Con relación a los valores límites en metales pesados para los compost en la Unión Europea y en nuestro país, podemos ver en la Tabla 9 que existen algunas diferencias.

Tabla 9. Valores límites en metales pesados para el compost según legislaciones. Datos en mg/kg s.s. (Centemero y Corti, 2000).

País	Ley / Reglamento	Cd	Cr total	Cr^{VI}	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
Unión Europea	EEC 488/98 Ecolabel	1,0	100	-	100	1,0	50	100	300	10
Francia	Ley de Fertilizantes	1,5	300	-	600	1,0	100	100	1500	-
Alemania	Ley BioAbFV Clase I	1,0	70	-	70	0,7	35	100	300	-
	Clase II	1,5	100	-	100	1,0	50	150	400	-
Italia	Ley 748/84	1,5	-	0,5	150	1,5	50	140	500	-
España	Ley de Fertilizantes	10	400	0	450	7	120	300	1100	-

El control de la contaminación no puede ser restringido al proceso de fabricación de compost. También el almacenamiento de los materiales a tratar y el producto final pueden representar riesgos de contaminación a veces mayores que los del compost en fase activa.

Para evitar en lo posible la contaminación, al menos, se han de observar una serie de medidas:

- Mantener las pilas de compost con un contenido en humedad inferior al máximo recomendado (65%) para minimizar la producción de lixiviados.
- Combinar las materias primas en una proporción tal que el valor de la relación C/N esté dentro de los valores recomendados para evitar pérdidas de nitrógeno.
- No permitir que las aguas y lixiviados que procedan de la zona de compostaje viertan a los cauces de aguas superficiales ya que muchos de los contaminantes, que pueden causar problemas en ríos y lagos, se eliminan de forma efectiva en el propio suelo. Las escorrentías pueden canalizarse hacia las tierras de cultivo, también pueden recogerse en sitios apropiados y ser posteriormente utilizadas para riego o para humedecer los materiales de compostaje que estén muy secos.
- Evitar que el agua llegue a la zona de compostaje mediante apropiadas elevaciones del terreno.
- Observar estrictamente las distancias de separación a aguas superficiales y subterráneas recomendadas en la Tabla 8.
- Almacenar los materiales de partida y los compost terminados en zonas cubiertas, lejos de aguas superficiales y vías de drenaje. Los materiales de partida que estén muy húmedos se han de almacenar bajo cubierto y a ser posible en una superficie impermeable con un sistema de recogida de lixiviados.

7. EVALUACION DE LA MADUREZ DE UN COMPOST

La evaluación de la madurez de un compost es uno de los problemas más importantes que se plantea en relación al proceso de compostaje y aplicación del producto obtenido al suelo.

La poca rentabilidad general de las empresas privadas dedicadas al compostaje tiene como consecuencia que el producto que se ofrece al mercado agrícola no sea tan bueno como sería necesario.

El funcionamiento de las plantas de compostaje encuentran como principales problemas la gran heterogeneidad de los materiales a tratar, ubicación y diseños no adecuados y problemas de comercialización del compost obtenido. Este problema se debe a que la preocupación principal al diseñar una planta es la de eliminar un residuo, y no la de producir un abono de calidad conocida más o menos constante.



Figura 15. *En verano es conveniente cubrir las pilas para evitar una excesiva desecación.*

7.1. Efectos de la aplicación de un compost insuficientemente maduro

La aplicación de un compost insuficientemente maduro o "inmaduro" puede provocar como efecto más destacado un bloqueo biológico del nitrógeno asimilable, lo que podría ocasionar posteriormente un descenso del contenido de este nutriente en la planta y, en definitiva, un menor rendimiento de la cosecha.

La inmovilización del nitrógeno mineral en el suelo, se debe a que el compost "inmaduro" posee una relación C/N elevada, debido principalmente a que va a tener alto contenido en sustancias hidrocarbonadas, con lo cual, la aplicación al suelo en estas condiciones da lugar a un aumento de la microflora que utiliza parte del nitrógeno presente en el suelo para la formación de distintas estructuras intracelulares, como proteínas y ácidos nucleicos.

Por otra parte, la incorporación de estos productos insuficientemente maduros al suelo origina la descomposición posterior de estas sustancias que pueden producir serios daños tanto en el suelo como en la planta. Así, se ha descrito que se produce un descenso del contenido de oxígeno y del potencial de oxidoreducción del suelo, favoreciéndose la creación de zonas de anaerobiosis y fuertemente reductoras. Esto, unido a un aumento de la temperatura, puede llegar a inhibir la germinación o, en ocasiones, se produce una disminución en el desarrollo de las plantas, especialmente cuando se encuentran en estadios más jóvenes, al reducir la respiración de las raíces, ralentizar la absorción de elementos minerales y disminuir la síntesis de giberelinas y citoquininas, y su transporte a las partes aéreas.

Además, la creación de estas zonas fuertemente reductoras en el suelo, van a ocasionar un aumento de la solubilidad de los metales pesados cuya posterior absorción y concentración en la planta pueden llegar a alcanzar niveles fitotóxicos. Así, por ejemplo, la concentración de cobre en la planta aumenta considerablemente, por encima de niveles tóxicos, tras la aplicación de compost "inmaduros", fenómeno no observable cuando se utilizan compost maduros.

Otro riesgo que presentan estos productos es la presencia de sustancias fitotóxicas, fenómeno observado en la utilización de compost procedentes de diversos residuos vegetales, así como estiércoles que pueden inhibir la germinación y el crecimiento de las plantas.

El efecto fitotóxico puede ser debido a la formación de amoníaco, producido como consecuencia de la degradación de la materia orgánica residual y cuya presencia incluso en cantidades pequeñas es tóxica para las raíces y para el desarrollo de las plantas, así como para la germinación de las semillas (intoxicación amoniacal). Otro tipo de sustancias que se piensa que son fitotóxicas son el óxido de etileno, y algunos ácidos orgánicos, como el ácido acético, propiónico y butírico.

Todos estos efectos pueden ser patentes cuando las temperaturas son bajas, pudiendo no apreciarse en suelos con buenas reservas de nitrógeno y temperaturas superiores a 15º C.

7.2. Métodos para determinar el grado de madurez de un compost

Para que los efectos de la aplicación del compost sean positivos, éste debe ser lo suficientemente maduro, es decir, estable, de lo contrario la materia orgánica poco estabilizada seguirá el proceso de descomposición en el suelo pudiendo provocar problemas. Para evitar estos posibles efectos negativos se hace necesaria la evaluación de la madurez de un compost.

Es difícil, por no decir imposible, la definición de la calidad de un compost a partir de un único parámetro químico, bioquímico y toxicológico, ya que el proceso de compostaje es un proceso microbiológico muy complejo.

Hasta el momento no existe un único método aceptado de forma generalizada para determinar el grado de madurez del compost. Se ha trabajado con diversos parámetros que informan, de manera relativa, de la evolución de la materia orgánica durante el proceso o como parámetro definitorio de la calidad del producto ya a la venta.

En todos los casos pueden existir problemas ya que un parámetro podría ser un buen indicador del grado de madurez desde un punto de vista teórico, pero inaplicable por su pérdida de significación al ignorar la historia de la muestra, o por no ser aplicable a los análisis de rutina.

Aunque no se dispone de un método simple y reproducible, son muchos y diferentes los criterios propuestos. Estos se pueden agrupar en 5 tipos:

- test de tipo físico
- estudios de la actividad microbiana
- estudios de la fracción húmica del compost
- métodos químicos
- métodos biológicos o test de fitotoxicidad.

Entre los distintos métodos existen algunos rápidos pero poco fiables, como los basados en la cromatografía sobre papel y otros más complejos basados en medidas de la evolución del complejo húmico. También se han propuesto algunos índices, tales como las relaciones C/N, C en azúcares reductores/C total, reparto del nitrógeno en forma amoniacal y nítrica, la capacidad de cambio catiónico o el desprendimiento de ácido sulfhídrico.

7.2.1. Test de tipo físico

Son los habitualmente utilizados y, en general, dan una idea aproximada de la madurez de un compost. Entre ellos se incluyen factores tales como ausencia de olor desagradable, color oscuro y temperatura estable.

a) **Olor**: El compost maduro debe tener ausencia de olor desagradable y debe tener un olor similar a la tierra húmeda.

b) **Color**: Durante el proceso de compostaje, el material sufre un proceso de oscurecimiento o melanización hasta transformarse en un producto oscuro. Aunque los mecanismos del proceso citado no son bien conocidos, en ellos se incluyen reacciones de la humificación, tipo aminocarbonilo y tipo Maillard, sin descartar otras reacciones que ocurren a menor temperatura. Se han propuesto algunas técnicas para determinar el grado de ennegrecimiento. De acuerdo a nuestra experiencia, la formación de zonas más claras en el interior del montón nos estarían indicando problemas de anaerobiosis durante el proceso de compostaje.

c) **Temperatura estable:** Tal como hemos comentado en apartados anteriores, durante el compostaje se considera la evolución de la temperatura, como reflejo de la actividad de la población microbiana involucrada en el proceso, que decrece considerablemente al final del mismo, determinando una disminución de la temperatura del material compostado de 60 - 70º C hasta temperatura ambiente. En este sentido, un compost se considera maduro cuando la curva de temperatura del mismo se ha estabilizado y no varía con el volteo del material.

7.2.2. Métodos basados en el estudio de la evolución de parámetros de actividad microbiana

En general, aunque las técnicas microbiológicas y bioquímicas son adecuadas para determinar el grado de madurez de un compost, resultan laboriosas y, por tanto, inaplicables en un análisis rutinario. Estos métodos están basados, en parte, en la hipótesis que establece que la madurez de un compost se alcanza por estabilidad biológica del producto. El grado de estabilidad se puede determinar directamente a partir del conteo de la biomasa microbiana o de medidas de la actividad metabólica o bien, indirectamente, por medio del estudio de los constituyentes fácilmente biodegradables o su susceptibilidad a la degradación.

7.2.3. Métodos basados en el estudio de la materia orgánica humificada del compost

Algunos autores han tratado de relacionar el grado de madurez de un compost con las características de los compuestos húmicos presentes en el mismo, principalmente atendiendo a su grado de polimerización, tasa de extracción y su riqueza en el compost. Así, se emplea como índice de madurez, la relación carbono de ácidos fúlvicos/carbono de ácidos húmicos, que debe de disminuir a lo largo del proceso.

Otros métodos que se incluyen en este apartado son la cromatografía circular y los métodos colorimétricos. El primer ensayo consiste en aislar las sustancias húmicas extraídas de un compost y colocarlas sobre un papel de filtro, pretratado con nitrato de plata; los compuestos poco polimerizados son muy móviles y se alejarán del centro. Cuando el compost esté maduro, la mancha oscura que aparecerá en el papel se hará más intensa alrededor del centro y más clara en los bordes; si dicho producto no es estable, el centro aparecerá claro y el borde oscuro (*Hertelendy*, 1974). Este tipo de ensayo es cualitativo y está muy influenciado por los materiales de partida (*Costa* et al., 1991).

En cuanto a la aplicación de los métodos colorimétricos, se basan en que la determinación de la densidad óptica de un extracto en pirofosfato de las sustancias húmicas a lo largo del proceso pone de manifiesto una curva típica de variación que puede señalar la aparición de un "umbral de madurez" por el cambio de pendiente de la curva de densidad óptica frente al tiempo. Otro método similar es el cálculo de la absorbancia del extracto alcalino a 460 y 660 nm, cuya relación ha sido utilizada como índice de madurez.



Figura 16. *Esparcidor de compost de alto rendimiento en el campo. Se puede ver el fondo móvil y dos platos giratorios.*

7.2.4. Tests de tipo químico

Existe un gran número de test o análisis químicos que pueden ser utilizados, con un mayor grado de confianza que los físicos, como criterios indicadores del grado de madurez de los compost. Entre ellos se pueden destacar:

a) Relación C/N (en fase sólida)

Es el criterio tradicionalmente utilizado para la determinación de la estabilidad de un compost. Si bien pueden presentar alguna dificultad en la selección de muestras lo suficientemente homogéneas, la determinación del mismo es relativamente sencilla y rápida. Por lo general, un compost se considera maduro cuando su relación C/N es menor de 20 y lo más cercano a 15, aunque en la práctica dicho valor puede ser superior, ya que gran parte del carbono orgánico, al encontrarse en formas resistentes como son celulosas o ligninas, no puede ser utilizado de inmediato por los microorganismos.

La relación C/N es un índice interesante para seguir la evolución de un proceso de compostaje a pie de planta, ya que da mucha información si se conoce la relación C/N de partida. Si no, la interpretación es difícil. Por ejemplo, un compost con una relación C/N relativamente alta puede estar

bien fermentado y estar maduro, si procede de RSU con una relación C/N alta, lo que ocurre, por ejemplo, si no se han eliminado papeles y cartones. Por el contrario, un compost con una relación C/N baja puede ser fresco y poco fermentado, como puede ocurrir si procede de una mezcla de RSU con otros residuos con elevado contenido en N, como son los lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas.

b) Relación C/N orgánico en extracto acuoso:

La reacción de compostaje es, básicamente, una degradación bioquímica de la materia orgánica por acción de los microorganismos. Los componentes solubles de la misma se disuelven en agua y son asimilables por los microorganismos. Los compuestos insolubles son transformados enzimáticamente en compuestos solubles y posteriormente absorbidos por las células microbianas. Este hecho ha sido utilizado por diversos autores para obtener un nuevo índice de la maduración del compost. Dicho índice, basado en la determinación del C orgánico y del N orgánico en los extractos acuosos del producto, disminuye a medida que avanza la degradación del residuo, hasta estabilizarse entre 5 y 6, cuando el producto ha madurado, lo que hace que pueda ser utilizado como parámetro esencial de la madurez. A diferencia de la relación C/N del sólido maduro, este índice presenta unos valores mucho menos variables, al ser menos dependientes del tipo y origen del material inicial.

c) Determinación de la DQO del compost:

Constituye un método rápido y sencillo para evaluar el grado de madurez del compost. Básicamente consiste en una oxidación del material mediante dicromato potásico y valoración posterior con sulfato ferroso amónico.

d) pH:

También la determinación del pH sería un buen indicador de la marcha del proceso ya que, por lo general, durante el compostaje, el pH disminuye ligeramente, para subir posteriormente a medida que el material se va estabilizando, quedando al final del proceso entre 7 y 8. Valores más bajos indicarían que se han producido fenómenos de anaerobiosis y que el material no está aún maduro.

e) Capacidad de cambio catiónico (CIC):

Su determinación en un abono orgánico no tiene solamente interés por el valor agronómico que representa este parámetro, es decir, nos da idea de la potencialidad en la retención de nutrientes y capacidad de inmovilización de sustancias fitotóxicas, así como la posibilidad de amortiguar cambios súbitos de pH, sino que utilizado adecuadamente nos puede informar de la estabilidad de la materia orgánica de dicho compost.

Diversos estudios realizados con abonos orgánicos y compost de diversos residuos orgánicos han demostrado que la CIC aumenta a medida que aumenta el grado de estabilidad de la materia orgánica.

f) Conductividad eléctrica:

Un parámetro que es interesante conocer, aunque no se englobe dentro de los criterios de maduración del compost, es la conductividad eléctrica final. Depende de los materiales con que se ha elaborado el compost (purines, agua…) y seremos más o menos exigentes con ella en función de la utilización que se fuera a dar al producto. No sería lo mismo confeccionar compost para uso como fertilizante para incorporar al suelo, que como sustrato de plantas hortícolas producidas en alvéolos o contenedores. La conductividad del compost puede afectar al test de germinación pudiendo oscilar entre los 440 y los 6.590 µS/cm en el caso de una turba normal o si se trata de estiércol de pollos, respectivamente. Lo deseable en el caso de compost es que se encuentren entre los 1.500-2.000 µS/cm.

7.2.5. Test de tipo biológico

Ultimamente se están desarrollando un gran número de test de tipo biológico, con el fin de evaluar la madurez de un compost, estos test están basados en el efecto negativo que provoca la aplicación de compost "inmaduros" sobre la germinación de las semillas debido a la presencia de compuestos fitotóxicos en estos productos. Estos test consisten fundamentalmente en la obtención de un extracto acuoso del material que es introducido en una placa Petri de incubación donde se determina el grado de germinación. En general, un compost se considera maduro cuando el índice de germinación es superior al 50%.

Ensayos de respuesta vegetal, aunque laboriosos, podrían ser recomendables para estudiar el efecto del compost sobre la producción vegetal. Recomendamos realizar estos ensayos utilizando diferentes tipos de suelo y como planta testigo *Lolium rigidum*, debido a su capacidad de extracción de los nutrientes del suelo y porque permite cortes sucesivos con los que evaluar la acción del compost sobre la producción de biomasa en distintos períodos de tiempo desde la aplicación de la enmienda (*Negro y Solano*, 1996).



Figura 17. *Ensayos de respuesta vegetal con* Lolium *en cámara de cultivo.*

8. LEGISLACION

En cuanto a la legislación existente en España, en lo referente a las características que ha de cumplir un compost para su aplicación en agricultura, existe una tabla recogida en el Anejo 3 de la Orden de 28 de mayo de 1998, modificada por la Orden de 2 de noviembre de 1999 del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación sobre productos fertilizantes y afines.

De acuerdo a lo reflejado en la tabla antes mencionada se define como Compost a todo producto obtenido por fermentación controlada de residuos orgánicos, siendo regulados tanto el contenido mínimo en principios activos (% en peso) como los elementos fertilizantes cuyo contenido ha de garantizarse, como se recoge en la Tabla 10.

Por otra parte, en la Unión Europea existe lo que se conoce como etiqueta ecológica a enmiendas del suelo. El interés creciente del consumidor por utilizar productos poco perjudiciales para el medio ambiente ha llevado a los estados miembros de la Unión Europea a establecer un sistema voluntario de concesión de etiqueta ecológica a aquellos productos que cumplan con las características adecuadas para la protección del medio ambiente. En 1994 se establecieron los criterios ecológicos para la concesión de la etiqueta ecológica comunitaria a las enmiendas del suelo. Dichos criterios quedan recogidos en la Decisión 94/923/CE de la Comisión, de 14 de noviembre de 1994 (DOCE Nº L 364 de 31 de diciembre de 1994). En esta Directiva se consideran únicamente a los materiales cuyo contenido orgánico proceda de materia derivada del tratamiento o reutilización de materiales de desecho.

Tabla 10. Características que ha de cumplir un compost para su aplicación en agricultura.

Contenido mínimo de principios activos (% en peso)	Elementos fertilizantes cuyo contenido ha de garantizarse
Materia orgánica total: 25% sobre materia seca Humedad máxima: 40% El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25 mm. Los límites máximos admitidos en relación con los elementos pesados son los siguientes: Cadmio 10 ppm (mg/kg) Cobre 450 ppm (mg/kg) Níquel 120 ppm (mg/kg) Plomo 300 ppm (mg/kg) Zinc 1.100 ppm (mg/kg) Mercurio 7 ppm (mg/kg) Cromo 400 ppm (mg/kg)	- Nitrógeno total - Nitrógeno orgánico - Materia orgánica total - Humedad máxima - Las materias primas utilizadas serán declaradas cuando alcancen el 20% del peso. Podrán declararse cuando alcancen el 5% del peso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades obtenidas en las diferentes Instituciones participantes en el Proyecto, financiado por el INIA (SC 96081), sin las cuales no hubiera podido llevarse a cabo.

BIBLIOGRAFIA

- Centemero, M. y Corti, C. (2000). «Caratteristiche tecniche del compost per un'agricoltura sostenible». L'Informatore Agrario. 6, 110-116.
- Costa, F.; García, C.; Hernández, T. y Polo, A. (1991). «Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización». Ed. CSIC, Madrid.
- Crawford, J.H. (1985). «Composting of agricultural wastes. In Biotechnology Applications and Research». Ed. P.H. Cheremisinoff and R. P. Ouellette Technomic Publishing A.G.
- Fitzpatrick, G.E. (1993). «A program for determining compost bleding ratios». Compost Science & Utilization, 1 (3), 30-33.
- Fermore, T.R. (1993). «Applied aspects of composting and bioconversion of lignocellulosic materials: an overview». International Biodeterioration & Biodegradation 31, 87-106.
- Gasser, J.K.R. (Ed.). (1984). «Composting of Agricultural and other Wastes». Elsevier Applied Science Publishers. London and New York.
- Golueke, C.G. (1972). «Composting: A Study of the process and its Principles». JG Press Inc. Emmaus-Penn Ed.
- Hertelendy, K. (1974). «Paper chromatography a quick method to determinate the degree of humification». Compost IRCWD News. n. 7, 1-3.
- Mustin, M. (1987). «Le compost. Gestion de la matière organique». Ed. F. Dubusc. Paris.
- Negro, M.J. y Solano, M.L. (1996). «Laboratory composting assays of the solid residue resulting from the flocculation of oil mill wastewater with different lignocellulosic residues». Compost Science and Utilization 4(4), 62-71.
- Rynk, R., M. Van de Kamp, G.B. Willson, M.E. Singley, T.L. Richard, J.J. Kolega, F.R. Gouin, L. Laliberty, Jr., D. Kay, D. W. Murphy, H.A.J. Hointink y W.F. Brinton (1992). «On-farm Composting Handbook». Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, N.Y.
- Saña, J. y Soliva, M. (1987). «El compostaje: Proceso, sistemas y aplicaciones». Quaderns d'ecologia aplicada, nº 11. Diputació de Barcelona. Servei de Medi Ambient. Barcelona.
- Urbano Terrón, P. (1992). «Tratado de Fitotecnia General». Ed. Mundi-prensa. Madrid.

Información elaborada por:

M.J. NEGRO[1], F. VILLA[2], J. AIBAR[3], R. ALARCÓN[4], P. CIRIA[1], M.V. CRISTÓBAL[5], A. DE BENITO[5], A. GARCÍA MARTÍN[6], G. GARCÍA MURIEDAS[4], C. LABRADOR[6], C. LACASTA[7], J.A. LEZAÚN[8], R. MECO[9], G. PARDO[2], M.L. SOLANO[1], C. TORNER[4], C. ZARAGOZA[2]

[1]CIEMAT, [2]DGA. Zaragoza, [3]EUP. Huesca, [4]INIA. El Encín, [5]SITA. Valladolid, [6]SIDT. Badajoz, [7]CSIC. Toledo, [8]ITGA. Navarra, [9]SIA. Toledo.

Fotos y gráficos: C.I.E.M.A.T. y Centro de Técnicas Agrarias.

Se autoriza la reproducción íntegra de esta publicación, mencionando su origen:
Informaciones Técnicas del Departamento de Agricultura de la D.G.A.

Para más información, puede consultar al CENTRO DE TECNICAS AGRARIAS:
Apartado de Correos 727 • 50080 Zaragoza • Teléfono 976 71 63 41

Edita: Diputación General de Aragón. Dirección General de Tecnología Agraria. Servicio de Formación y Extensión Agraria. **Composición:** Centro de Técnicas Agrarias. **Imprime:** Talleres Editoriales Cometa, S.A. **Depósito Legal:** Z-3094/96. **I.S.S.N.:** 1137/1730.

GOBIERNO DE ARAGON
Departamento de Agricultura